

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ПЕТРЕНКО ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 531.383

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ  
ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ  
РЕЗОНАТОРОМ**

05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи

**ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник

д.т.н., проф.

В.В. Чіковані

Київ – 2020

## **АНОТАЦІЯ**

**Петренко О.В. Удосконалення методів підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

### **У дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:**

Вперше розроблений та реалізований багатопараметричний спосіб корекції масштабного коефіцієнту Коріолісового вібраційного гіроскопа (КВГ), який може бути використаний при роботі КВГ як у режимі датчика кутової швидкості (КВГ-ДКШ), так і в диференційному режимі (КВГ-ДКШ-Д). На цей спосіб отримано патент України.

Вперше був розроблений і проведений науково обґрунтований аналіз нової конструкції циліндричного резонатора з отворами на твірній поверхні циліндру, що має більш високу вібро-ударостійкість.

Розроблений та реалізований алгоритм багатопараметричної корекції дрейфу нуля, що має переваги над існуючими по точності корекції.

Вперше проведені експериментальні дослідження на виготовленому експериментальному зразку КВГ з розробленим металевим циліндричним резонатором із елінварного сплаву, які показали високу точність корекції масштабного коефіцієнту та дрейфу нуля при дії температурного градієнту, а також високу вібро-ударостійкість розробленого зразка.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи** полягає в тому, що:

– проведено порівняння двох конструкцій металевих циліндричних резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру. Шляхом розрахунків і комп'ютерного моделювання обґрунтовані переваги другого варіанту конструкції над першим у частині вібро-ударостійкості;

– проведено аналіз отворів різної геометрії. Виявлено їх вплив на резонансні частоти коливань циліндричного резонатора. Вироблено рекомендації щодо геометрії резонатора та його елементів;

– удосконалено конструкцію основи, на яку встановлюється новий розроблений резонатор з отворами на твірній поверхні циліндру;

– експериментально обґрунтовано вибір п'єзoeлектродів, що використовуються для збудження коливань і вимірювання сигналів металевого резонатора;

– розроблено методикута обладнання для робочого місця безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення;

– проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі і похибок позиціонування п'єзoeлектродів на зміщення нуля та масштабний коефіцієнт КВГ;

– розроблено конструкцію приладдя для приклеювання п'єзoeлектродів до резонатора нової конструкції;

– розроблено методику та обладнання робочого місця для балансування мас резонатора по четвертій гармонії дебалансу для зменшення його різночастотності. Методика апробована при виготовленні експериментального зразка КВГ;

– розроблено та реалізовано, при виготовленні експериментального зразка КВГ, методику вимірювання кутів неортогональності осі чутливості до його монтажної поверхні;

– проаналізовано питання використання КВГ для підвищення точності стабілізації блоку озброєння легкоброньованої техніки.

– удосконалено блок-схему алгоритму керування стоячою хвилею КВГ, що забезпечує швидкий старт гіроскопа при його включенні на будь-якій температурі з діапазону робочих температур;

– розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової

швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля і масштабного коефіцієнту, що призводить до збільшення точності виміру кутової швидкості в умовах дії температурних градієнтів;

– експериментальні результати показали, що КВГ з металевим резонатором є стійким до дії багаторазових ударів амплітудою 100g, його зміщення нуля слабо залежить від амплітуди удару та не перевищує  $5 \times 10^{-3}$  град/с. Чутливість зміщення нуля до вібраційних збурень є на рівні  $2,5 \times 10^{-3}$  град/с/g.

У **вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, можливості підвищення точності КВГ, сформульовано мету і завдання, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовано конструкцію основних частин КВГ з металевим резонатором, визначено принципи їх побудови для проведення моделювання. Проведено вибір матеріалу для виготовлення резонаторів КВГ на основі визначення ТКЧ. На основі розрахунків визначено чутливість частоти резонатора до температури. Проаналізовано власні частоти резонатору КВГ з отворами на його дні у формі «круг» та «трикутник» та обрано конструкції резонаторів з оптимальними характеристиками. Розглянуті недоліки запропонованих конструкцій та проведено моделювання резонаторів з отворами, що виконуються на твірній поверхні циліндра, а спиці, що утворилися в результаті виконання отворів шліфуються для отримання плоскої поверхні під кріплення п'єзодатчиків. Виконано підбір виконавчих елементів та датчиків системи керування хвилею КВГ шляхом визначення залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури.

У **другому розділі** проведено перевірку зразків основних параметрів металевого резонатору за допомогою розробленого акустичного методу. Розроблено функціональну схему та спроектовано спеціальне робоче місце для визначення резонансних частот, різночастотності, добротності,



різнодобротності. Проведено оцінку впливу різночастотності на зміщення нуля КВГ, різночастотності та різнодобротності на кут хвилі  $\delta\varphi$ . Визначено допустимі параметри різночастотності ( $\Delta F \leq 0,01$  Гц) та кута орієнтації хвилі ( $\delta\varphi \leq 2^\circ$ ) для проведення операції балансування. Розроблено методику та робоче місце балансування металевого резонатора та визначення дисбалансу мас по четвертій формі дефекту. Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елементу до монтажної поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка.

У **третьому розділі** розглянуто шляхи підвищення точності систем стабілізації бортових систем навігації та керування рухом. Розглянуто режими роботи КВГ, які можуть використовуватися в якості чутливих елементів сучасних стабілізаторів озброєння. Розроблено математичну модель КВГ, що реалізована у вигляді блок-схеми Matlab-Simulink, як датчика кутової швидкості зі зворотним зв'язком, на базі звісної узагальненої моделі двомірних коливань резонатору. Розглянуто математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. Розглянуто інтегруючий режим роботи КВГ, в якому сила Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання вібраційної структури, не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. Розроблена повна нелінійна Matlab-Simulink-модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи та має можливість автоматичного перемикання з режиму на режим.

У **четвертому розділі** розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди збудження, що впливають на зміщення нуля КВГ. Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Розроблено багатопараметричний спосіб корекції масштабного коефіцієнту за рахунок додаткових вимірювань сигналів, які забезпечують повніший і точніший опис його змін. Розроблено методики паспортизації основних параметрів КВГ:

діапазон вимірювання кутових швидкостей, повторюваність МК, не лінійність МК, стабільність зміщення нуля, повторюваність зміщення нуля від включення до включення, випадковий ухід як в нормальних умовах, так і в діапазоні температур. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації та ударів.

У **загальних висновках** сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що представлені у дисертаційній роботі. Головний науковий результат дисертаційної роботи полягає у підвищенні точності КВГ при роботі в широкому діапазоні температур. Такий результат досягається за рахунок вибору оптимальних параметрів складових частин КВГ, температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди, вихідного сигналу та масштабного коефіцієнта.

**Ключові слова:** коріолісовий вібраційний гіроскоп, металевий резонатор, режим вимірювання кутової швидкості, зміщення нуля, масштабний коефіцієнт, корекція, зовнішні збурення.

## SUMMARY

Petrenko O. V. «Accuracy increasing methods improvement for metallic cylindrical resonator vibratory gyroscope». - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a candidate of sciences degree in specialty 05.11.03 «Gyroscopes and navigation systems». National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

In the thesis the following new scientific results are obtained:

For the first time, a multi-parameter method of CVG scale factor correction is developed and implemented, which can be used during the CVG operation in the rate and in the differential modes. Ukraine patent have been obtained for this method.

Scientifically grounded analysis of a new design of a cylindrical resonator with holes on the walls of a cylinder having higher vibration resistance was first developed and carried out.

The multiparameter bias correction algorithm has been developed and implemented, which has advantages over the existing ones by accuracy.

For the first time experimental researches were carried out on a manufactured experimental sample of CVG with developed metal cylindrical resonator made of elenvar elloy, which showed high accuracy scale factor and bias drift correction under the action of temperature gradient, as well as high shock-vibration resistance of the sample.

The practical significance of thesis results are:

- comparison of two designs of metallic cylindrical resonators with holes on the bottom and on the wall of the cylinder and by calculations and computer simulation the advantages of the second design over the first one in the part of shock resistance have been substantiated;

- an analysis of the different geometries of the holes has been made. Their influence on the resonant oscillation frequencies of a cylindrical resonator is revealed. Recommendations for the geometry of the resonator and its elements have been developed;

- improved design of the base on which the newly designed resonator with holes on the wall of the cylinder is installed;

- the choice of electrodes used for oscillation excitation and measurement of the signals is experimentally substantiated;

- the technique and equipment for workplace electrodeless measurement of metallic resonator dynamic parameters after its manufacture have been developed;

- the influence of frequency mismatch, wave angle and positioning errors of the electrodes on the CVG bias and scale coefficient have been evaluated;

- a new accessory design has been developed to attach the electrodes to the new resonator design;

- the technique and equipment of the workplace for balancing the mass of the resonator on the fourth harmonic of the unbalance to reduce its frequency mismatch have been developed. The technique was tested in the manufactured sample of CVG;

- the technique of measuring the angles of non-orthogonality of the sensitive axis to its mounting surface has been developed and implemented in the experimental sample of CVG;
- the use of CVG to improve the accuracy of armament stabilization was analyzed;
- improved CVG standing wave control algorithm block diagram, which provides a fast start of the gyroscope when it is turned on at any temperature in the range of operating temperatures;
- the techniques for temperature correction of quadrature and angular rate phases, multiparameter correction of CVG bias and scale factor have been developed and tested on experimental sample of CVG, which leads to an increase in the accuracy of measuring angular rate under temperature gradients;
- the experimental results showed that the CVG with a metallic resonator is resistant to multiple shocks with amplitude 100 g and its bias is slightly dependent on the shock amplitude and does not exceed  $5 \times 10^{-3} \text{ deg/s}$ . The bias sensitivity to vibration perturbations is  $2,5 \times 10^{-3} \text{ deg/s/g}$ .

**The introduction** justifies the relevance of research, potential for accuracy increase of CVG, formulates the aim and task, science novelty, and practical significance of the obtained results. The main scientific and practical results obtained in the thesis are presented. The structure and the volume of the thesis are determined.

**The first section** analyses the design of the main components of CVG with metal resonator, and determines the principles of their construction for modeling. The choice of material for CVG manufacturing is made based on the temperature coefficient of frequency. Based on the estimations, the sensitivity of the resonator frequency to temperature is determined. The natural frequencies of the CVG resonator with holes at its bottom in the form of "circle" and "triangle" are analyzed and the designs of resonators with optimal characteristics are selected. The shortcomings of the proposed designs are considered and the resonators with holes made on the generating surface of the cylinder are modeled, and the spokes formed as a result of making holes are ground to obtain a flat surface for mounting piezoelectric

sensors. The selection of actuators and sensors of the CVG wave control system was performed by determining the dependence of the capacity of piezoceramic plates on temperature.

In **the second section**, the samples of the main parameters of the metal resonator were checked using the developed acoustic method. The functional scheme is developed and the special workplace for determination of resonant frequencies, frequency mismatch, quality factor, quality factor mismatch is designed. The influence of frequency mismatch on the displacement of CVG bias, frequency mismatch and quality factor mismatch on the wave angle  $\delta\varphi$  is estimated. Permissible parameters of frequency mismatch ( $\Delta F \leq 0,01$  Hz) and angle of wave orientation ( $\delta\varphi \leq 2^\circ$ ) for balancing operation are determined. The technique and workplace for balancing the metal resonator and defining the eccentric masses on the fourth form of defect are developed. The influence that the sensitivity axis non-orthogonality of sensitive element have on the mounting surface of the CVG is estimated. The angles of non-orthogonality of the experimental sample are determined.

**The third section** states the ways for improving the accuracy of stabilization systems for onboard navigation and control systems. The modes of operation of CVG which can be used as sensitive elements of modern armament stabilizers are considered. A mathematical model of CVG has been developed, which is implemented in the form of a Matlab-Simulink block diagram, in a form of angular velocity sensor with feedback, based on the known generalized model of two-dimensional oscillations of the resonator. The mathematical model of CVG operation in the differential mode is considered, when the feedback, compensating the Coriolis wave, is preserved, and the additionally given control signal adjusts the vibration wave between the electrodes. The integrating mode of CVG operation is considered, where the Coriolis force arising owing to rotation of vibration structure is not compensated and causes rotation of a vibration wave towards rotation of a resonator. A complete nonlinear Matlab-Simulink-CVG model has been developed, which implements all its operating modes and has the ability to automatically switch from mode to mode.

In **the fourth section** the technique of carrying out the temperature correction of signal phases for quadrature and excitation amplitude influencing shift of CVG zero is elaborated. Temperature polynomial model of the CVG output signal has been developed as a relation between its input and output. A multi-parameter method of scale factor correction due to additional signal measurements has been prepared, which provides a more complete and accurate description of its changes. Methods of certification of the main parameters of CVG are developed: measurement range of angular velocities, repeatability of SF, nonlinearity of SF, stability of zero bias, repeatability of zero bias from inclusion to inclusion, random shift both in normal conditions and in the temperature range. The CVG sample was tested for the sensitivity of zero offset to vibration and shock.

In **the general conclusions** formulate the main results of theoretical and experimental researches presented in the thesis. The main scientific result of the thesis is to increase the accuracy of CVG due to its operation under a wide range of temperatures. This result is achieved by selecting the optimal parameters of the CVG components, temperature correction of signal phases for quadrature and amplitude, the output signal and the scale factor.

**Key words:** Coriolis vibrating gyroscope, metallic resonator, angular rate measurement mode, bias, scale factor, correction, external perturbations.

#### **Список основних публікацій здобувача:**

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

*Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:*

1. Petrenko O.V. Temperature correction of the signal phases in a vibratory gyroscope /O.V.Petrenko // Polish journal of science. — Warszawa, Poland, 2019. — №15(1). — PP.30-34.

2. O.Bezvesilna. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko,

V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system — Kharkiv, 2020. — №1/9(103) 2020. — PP. 39-45.

*Статті у фахових виданнях:*

3. Петренко О.В. Design analysis and parameters choice of metallic cylindrical resonator sensor for coriolis vibratory gyroscope /О.В. Петренко // Electronics and Control Systems . — NAU, Kyiv, 2014. — №2(40). — PP.87-91.

4. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2019. — №14. — С.103-108.

5. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. — Хмельницький, 2019. — №4(275). — С.169-175.

6. Петренко О.В. Багатопараметрична модель дрейфу вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2016. — №2. — С.93-97.

7. Цірук В.Г. Не ортогональності осі чутливості до монтажної поверхності вібраційного гіроскопа /В.Г. Цірук, О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2017. — №3. — С.158-160.

8. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. — Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2019. — №3(273). — С.158-163.

9. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2019. — №2(69). — С.21-25.

*Патенти України:*

10. Пат. на винахід 111408 Україна, МПК G01C 19/56. Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа / Малярів С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В.; заявник та власник Малярів С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В. — №a201409707; заявл. 04.09.2014; опубл. 25.04.2016, Бюл. №8.

11. Пат. на корисну модель 121394 Україна, МПК G01C 19/56. Вібраційний гіроскоп з компенсацією зміщення нуля / Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В., Крамаренко М.М.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». — №u201703313; заявл. 06.04.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.

12. Пат. на корисну модель 127341 Україна, МПК H02K 3/00. Електричний двигун постійного струму / Безвесільна О.М., Мірошник С.В., Малярів С.П., Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». — №u201802152; заявл. 02.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

13. Петренко О.В. Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків від температури в складі чутливого елемента вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, В.Г. Цірук // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». — 13-14 квітня, Київ, 2017. — С.56-59.

14. Chikovani V.V. Vibratory gyroscope scale factor multi-parametric calibration /V.V. Chikovani, O.B. Петренко // IEEE 3rd International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)». — 14-17 Oct., NAU, Kyiv, 2014. — PP.129-131.

15. Петренко А.В. Результаты испытаний вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность смещения нуля к внешним вибрациям и ударам /А.В. Петренко // Восьма міжнародна науково-практична



конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2015)». — 18-19 травня, НАУ, Київ, 2015. — С.300-302.

16. Петренко А.В. Балансировка металлического резонатора вибрационного гироскопа /А.В. Петренко // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2017». — 19-21 квітня, НАУ, Київ, 2017. — С.9.46-9.50.

17. Petrenko O.V. Damper for vibratory gyroscope that is used in rigid conditions with mechanical impact /O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The seventh world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies». — 19-21 Sept., NAU, Kyiv, 2016. — PP.3.3.51-3.3.55.

18. Chikovani V.V. Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy /V.V. Chikovani, O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The sixth world congress «Aviation in the XXI-st century». — 23-25 Sept., NAU, Kyiv, 2014. — №2. — PP.3.5.34-3.5.38.

19. Петренко О.В. Температурна модель масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015». — 28-29 квітня, Київ, 2015. — С.39.67-39.71.

20. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої бронетехніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2019)». — 21-22 травня, НАУ, Київ, 2019. — С.262-264.

21. Безвесільна О.М. Випробування ендокера для використання у гіроскопічних приладах /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення». — 9 липня, Тернопіль, 2019. — №40. — С.76-79.

22. Безвесільна О.М. Розширення діагностики відмов стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Матеріали науково-практичної конференції «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та іновацій». — 28-29 червня, Ужгород, Видавництво «Молодий вчений» 2019. — С.44-49.

23. Петренко О.В. Балансування металевого резонатора вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM». — НАУ, Київ, 2018. — С.82.

24. Безвесільна О.М. Автоматичне налаштування стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». — 23 Jul., Австрія, Відень, 2019. — №3. — С.44-46.

25. Петренко О.В. Шляхи підвищення точності стабілізації /О.В.Петренко, М.В.Ільченко // VII науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики і Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки». — 9-10 жовтня, Київ, 2019. — С.216-217.

26. Chikovani V. Features of Design of Coriolis Vibratory Gyroscopes Assigned for Unmanned Aerial Vehicles / Valeriy Chikovani, Olga Sushchenko, O.V. Petrenko and S. Egorov // 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019).— October 22-24, Kyiv, 2019. — PP.194-198

27. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейна для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — Видавництво «Молодий вчений» 2019. — №7(71). — С.43586.

28. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №8(72). — С.149-152.

29. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №9(73). — С.219-226.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>19</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>21</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ РЕЗОНАТОРОМ .....</b>	<b>38</b>
1.1.Принцип дії Коріолісового вібраційного гіроскопа.....	38
1.2.Аналіз конструкції та вибір параметрів чутливого елементу КВГ .....	39
1.2.1 Вибір матеріалу резонатора.....	41
1.2.2.Аналіз конструкції резонатора.....	44
1.2.3.Розрахунок конструкції резонатора.....	47
1.2.4.Моделювання конструкції резонатора.....	49
1.2.5.Оптимізація конструкції резонатора.....	51
1.2.6.Конструкція чутливого елементу КВГ .....	55
1.3.Виконавчі елементи та датчики системи керуванняхвилею вібраційного гіроскопа.....	58
1.3.1.Основні параметри п'єзокераміки.....	61
1.3.2.Визначення залежності ємності п'єзокераміки від температури.....	64
1.3.3.Співвідношення напруг на вході та виході чутливого елемента.....	69
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ1.....</b>	<b>71</b>
<b>ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 1.....</b>	<b>73</b>
<b>РОЗДІЛ 2 БЕЗЕЛЕКТРОДНЕ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА.....</b>	<b>77</b>
2.1.Вимірювання основних характеристик резонатора акустичним методом.....	77
2.2.Оцінка впливу різночастотності, кута хвилі похибок позиціонування п'єзокераміки на точність КВГ .....	82

	16
2.2.1.Оцінка впливу різночастотності на зміщення нуля.....	83
2.2.2.Оцінка впливу різночастотності на МК КВГ.....	85
2.2.3.Оцінка впливу різночастотності та різнодобротності на кут хвилі.....	85
2.2.4.Оцінка похибки приклеювання електрода вузла щодо електрода пучності.....	86
2.3.Розробка приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора.....	87
2.4.Балансування резонатора у складі генератора коливачів.....	90
2.4.1.Методи балансування металевих резонаторів.....	90
2.4.2.Вплив похибок виготовлення резонатора на основні характеристики КВГ.....	96
2.4.3.Методика проведення балансування металевих резонаторів.....	99
2.4.4.Визначення дебалансу мас резонатора по четвертій формі дефекту.....	101
2.4.5.Розробка робочого місця для балансування резонатора.....	105
2.4.6.Результат балансування резонатора в складі генератора коливачів.....	108
2.5.Неортогональності осі чутливості до монтажної поверхні вібраційного гіроскопу.....	111
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....</b>	<b>115</b>
<b>ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 2.....</b>	<b>115</b>
<b>РОЗДІЛ 3 РЕЖИМИ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА.....</b>	<b>119</b>
3.1.Шляхи підвищення точності системи стабілізації блоку озброєння.....	119
3.1.1.Принцип дії системи стабілізації.....	120
3.1.2.Підвищення точності стабілізації.....	124
3.2.Режими роботи КВГ.....	126

	17
3.2.1.Режим вимірювання кутової швидкості(КВГ-ДКШ).....	127
3.2.2.Диференціальний режим вимірювання кутової швидкості (КВГ-ДКШ-Д).....	137
3.2.3.Інтегруючий режим роботи КВГ (КВГ-І).....	147
3.2.3.1.Структурна схема інтегруючого КВГ-І.....	148
3.2.3.2.Simulink-модель інтегруючого КВГ-І.....	150
3.2.3.3.Результати моделювання КВГ-І.....	152
3.3.Реалізація режимів роботи КВГ в одному приладі.....	155
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....</b>	<b>158</b>
<b>ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 3.....</b>	<b>159</b>
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ НА ПОХИБКИ КВГ.....</b>	<b>165</b>
4.1.Вплив температури на фази сигналів КВГ та їх корекція.....	167
4.1.1.Дія впливу температури на фази сигналів КВГ.....	167
4.1.2.Взаємний вплив сигналів квадратури та збудження.....	168
4.1.3.Температурна корекція фаз сигналів КВГ.....	170
4.2.Вплив температури на зміщення нуля КВГ та його корекція.....	173
4.2.1.Зміщення нуля у вібраційних гіроскопах.....	173
4.2.2.Модель вихідного сигналу КВГ.....	176
4.2.3.Температурна корекція вихідного сигналу КВГ.....	178
4.3.Вплив температури на масштабний коефіцієнт КВГ та його корекція.....	183
4.3.1.Масштабний коефіцієнт вібраційного гіроскопа.....	183
4.3.2.Багатопараметрична модель масштабногo коефіцієнта.....	184
4.4.Паспортизація параметрів КВГ.....	189
4.5.Випробування КВГ на чутливість зміщення нуля до зовнішніх збурень.....	201
4.5.1.Випробування КВГ на чутливість зміщення нуля до	

вібрації.....	191
4.5.2.Випробування КВГ начутливість зміщення нуля до ударів.....	194
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4</b> .....	196
<b>ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 4</b> .....	197
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b> .....	201
<b>ДОДАТКИ</b> .....	204
<b>Додаток А.</b> Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	205
<b>Додаток Б.</b> Матеріали патенту на винахід «Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа».....	209
<b>Додаток В.</b> Матеріали патенту на корисну модель «Вібраційний гіроскоп з компенсацією зміщення нуля».....	212
<b>Додаток Г.</b> Матеріали патенту на корисну модель «Електричний двигун постійного струму».....	215
<b>Додаток Д.</b> Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комплект конструкторської та технологічної документації приладу «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-04».....	217
<b>Додаток Е</b> Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комплект конструкторської та технологічної документації приладу «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-03».....	218

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АРП	—	автоматичне регулювання посилення
БО	—	блок озброєння
ВН	—	вертикальне наведення
ВОГ	—	волоконно-оптичний гіроскоп
ВЧ	—	вісь чутливості
ГН	—	горизонтальне наведення
КВГ	—	Коріолісовий вібраційний гіроскоп
КВГ-ДКШ	—	КВГ, що працює у режимі датчика кутової швидкості
КВГ-ДКШ-Д	—	КВГ, що працює у диференційному режимі
КВГ-І	—	КВГ, що працює в інтегрованому режимі
КЛГ	—	кільцевий лазерний гіроскоп
КЦ	—	комутатор ланцюгів
МЕМС	—	мікроелектромеханічні системи
МК	—	масштабний коефіцієнт
ПІ	—	пропорційний-інтегруючий
ПІД	—	пропорційний-інтегруючий-диференціюючий
СКП	—	середньоквадратична похибка
СС	—	система стабілізації
ТКЛР	—	температурний коефіцієнт лінійного розширення
ТКМП	—	температурний коефіцієнт модуля пружності
ТКЧ	—	температурний коефіцієнт частоти
ФАПЧ	—	фазове автопідстроювання частоти
ЧЕ	—	чутливий елемент
ШІМ	—	модулятор широтно-імпульсний

$\Omega$	—	кутова швидкість
$\varphi$	—	кут орієнтації хвилі
$B$	—	зміщення нуля
$SF$	—	масштабний коефіцієнт
$F$	—	частота
$\Delta F$	—	різночастотність
$Q$	—	добротність
$\Delta Q$	—	різнодобротність



## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми наукового дослідження

Коріолісові вібраційні гіроскопи (КВГ) є однією з передових гіроскопічних технологій. Вібраційні гіроскопи – високотехнологічні сучасні прилади, принцип дії яких заснований на інерційних властивостях пружних хвиль, що генеруються в резонаторі на звукових частотах. Вони представляють собою важливу інерційну технологію не тільки тому, що демонструють високу точність і якість, але й тому, що інші інерціальні технології – кільцеві лазерні та волоконно-оптичні гіроскопи – не дозволяють так легко здійснити мікромініатюризацію, як це вже реалізовано для вібраційних гіроскопів. Мікромініатюрні КВГ, що засновані на мікроелектромеханічних системах (МЕМС), так звані МЕМС гіроскопи або МЕМС КВГ, є сучасною реальністю на світовому ринку.

Так як вібраційні гіроскопи використовують коливальний рух замість обертання, як в традиційних гіроскопах, то це дозволяє підвищити строк служби приладу за рахунок відсутності тертя в різних рухомих частинах і підшипниках. Це також спрощує конструкцію чутливого елемента, оскільки відсутні ротори та різні електричні двигуни, що дозволяє зменшувати їх габарити та масу. Вібраційні гіроскопи – це прилади, що використовуються для вимірювання абсолютної кутової швидкості, кута повороту, а в складі систем навігації, стабілізації, автопілотів – кути курсу, крену та тангажу рухомих об'єктів і платформ не тільки в авіації, а також в космонавтиці, морських і наземних об'єктах різного призначення.

Тенденція розвитку найсучасніших гіроскопічних технологій на світовому ринку використовує стратегію зниження вартості гіроскопів, що в свою чергу призводить до використання вібраційних гіроскопів. Вібраційні гіроскопи є одними із найбільш перспективних приладів з точки зору співвідношення собівартості і точності інформації, яка отримується за допомогою них. Собівартість даних приладів нижче, ніж у конкуруючих

приладів з такою ж точністю за рахунок простоти конструкції, мінімальної кількості компонентів чутливого елементу (ЧЕ), що спрощує збірку. Для виготовлення даних приладів використовують різні чутливі елементи, такі як кварцеві, п'єзоелектричні, металеві резонатори та резонатори з інших матеріалів. Вибір матеріалу, з якого буде створюватися майбутній гіроскоп залежить від вимог до чутливого елементу, умов експлуатації самого приладу і фінансових можливостей виробника та замовника. Вібраційні гіроскопи з металевими резонаторами в порівнянні з гіроскопами із кварцевими резонаторами мають меншу добротність і, як результат, меншу точність. Однак, складність і не технологічність виготовлення резонаторів з кварцевого скла для досягнення великої добротності, а також тривала і дорога процедура балансування мас робить кварцевий резонатор значно дорожче його металевого аналога. Висока чутливість та точність КВГ з металевим резонатором може бути досягнута за рахунок зростання віброуючої маси.

Водночас, КВГ з металевим резонатором нічим не поступаються конкуруючим технологіям, таким як кільцеві лазерні гіроскопи і волоконно-оптичні гіроскопи, по експлуатаційним характеристикам, а по показникам надійності значно перевищують їх. Тобто, основна відмінність технології виготовлення вібраційних гіроскопів з металевим резонатором від конкуруючих – це можливість швидкого і дешевого виготовлення гіроскопів, резонатори яких мають мінімальний температурний коефіцієнт частоти (у 5-10 разів менше ніж у резонаторів з кварцу) і досить високу добротність. Завдяки цьому КВГ будуть вдало конкурувати з іншими гіроскопами на світовому ринку.

Дана дисертаційна робота присвячена розробці конструкції і аналізу властивостей чутливого елементу вібраційного гіроскопа з резонатором, виготовленим із елінварного сплаву, визначення температурної обробки матеріалу резонатора, що дає можливість досягнути значення температурного коефіцієнта частоти на рівні 0,01-0,03 Гц/°С, розробці алгоритмів та методик температурної корекції фаз сигналів кутової швидкості та квадратури, що

забезпечують мінімізацію впливу одного сигналу на інший та призводить до підвищення точності, розробці нового методу корекції масштабного коефіцієнту, що має переваги над існуючим, а тож розробці та реалізації методу корекції дрейфу нуля КВГ. Крім того, проведені експериментальні дослідження зразка КВГ, який був виготовлений, на вібро-ударостійкість, а також точність і стабільності ключових параметрів приладу у широкому температурному діапазоні.

### **Актуальність роботи**

За хронологією, вібраційні гіроскопи – останні гіроскопічні технології, наявні в даний час на світовому ринку. Всі технологічно розвинені країни активно працюють над удосконаленням цієї технології з метою збільшення точності вимірювання кутової швидкості, зменшення габаритів і вартості кінцевої продукції. У цьому плані, вібраційні гіроскопи з металевим резонатором забезпечують достатньо високу точність, можуть застосовуватись для військових потреб, таких як системи стабілізації, наведення, орієнтації і управління польотом, та цивільних, таких як вимір положень залізничних колій та нафтопроводів, стабілізації кіно- і телеапаратури, безпілотних автомобілях та літаках, підводних пошукових апаратах та ін. Крім того, КВГ з металевим резонатором може працювати у трьох режимах роботи: режимі вимірювання кутової швидкості, інтегруючому та диференційному режимах, з автоматичним переключенням з режиму на режим, що розширює його можливості з використання у змінних умовах навколишнього середовища.

Застосування гіроскопів на різноманітних об'єктах вимагає від них багато у чому суперечливі вимоги. До них відносяться: стійкість до вібрацій, низька чутливість до лінійного прискорення, стійкість до ударів і, в той же час, невеликий шум при вимірюванні малих кутових швидкостей, великий діапазон вимірювання кутових швидкостей.

Тому актуальність роботи полягає у тому, що досліджується перший головний режим вимірювання кутової швидкості багаторежимного вібраційного гіроскопу, який має переваги перед двома іншими режимами в

частині більш високої точності при вимірюванні малих кутових швидкостей, має достатньо великий діапазон вимірювання, смугу пропускання та стійкість до вібро-ударних збурень, що задовольняє більшість потреб і, в той же час, має низьку вартість.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за темою: №244-ДБ19 «Методологія проектування високоточних стабілізованих платформ для комплексів спеціальної апаратури літальних апаратів з використанням перспективних інерціальних технологій» (номер держреєстрації 0119U100654); держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №95/22.01.08 «Розробка та впровадження методології дослідницького підходу при викладанні курсів, за профілем кафедри»; держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №15/22.01.08 «Розробка методології проектування робастних систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв визначення орієнтації рухомих об'єктів», а також відповідно до госпрозрахункової науково-дослідної роботи №796-X13 «Розробка методик корекції та паспортизації параметрів коріолісового вібраційного гіроскопа та дослідження режимів його роботи», а також згідно планів науково-технічної ради Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

### **Мета і завдання дослідження**

Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та розробка конструкції чутливого елементу вібраційного гіроскопа, що працює в режимі вимірювання кутової швидкості і забезпечує високу чутливість при вимірюванні малих кутових швидкостей, широкий діапазон вимірювання кутових швидкостей та достатньо високу стійкість до вібро-ударних прискорень, забезпечити корекцію зміщення нуля, масштабного коефіцієнту та мінімізувати вплив сигналу квадратури на сигнал кутової швидкості при зміні температури.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз властивостей чутливого елементу вібраційного гіроскопа з резонатором, виготовленим із елінварного сплаву.
2. Визначити параметри температурної обробки матеріалу резонатора, що дає можливість досягти значення температурного коефіцієнта частоти на рівні  $0,01-0,03$  Гц/°С.
3. Розробити алгоритм та методику температурної корекції фаз сигналів кутової швидкості та квадратури, що забезпечують мінімізацію впливу одного сигналу на інший.
4. Розробити спосіб багатопараметричної корекції масштабного коефіцієнту, що має перевагу над існуючим способом по точності.
5. Реалізувати багатопараметричну корекцію зміщення нуля, що має перевагу над існуючим способом по точності.
6. Виготовити експериментальний зразок КВГ з металевим циліндричним резонатором і провести експериментальні дослідження на вібро-ударостійкість і точність при постійній та змінній температурі.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання кутової швидкості за допомогою КВГ, що працює у режимі датчика кутової швидкості в умовах його експлуатації.

**Предметом дослідження** є методи підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором, аналізу властивостей чутливого елементу та корекції похибок, що пов'язані зі змінами навколишнього середовища.

**Методи дослідження.** Розробка конструкції резонатора та її аналіз виконується за допомогою комп'ютеризованих засобів конструювання та аналізу властивостей конструкції. Для оцінки кутової швидкості за результатами вимірювань використано стохастичні методи математичної статистики та теорії оцінювання. При розрахунку похибок використовувалися варіаційні та диференційні рівняння. Формування моделі і моделювання

режимів роботи КВГ виконувалося у системі Matlab-Simulink; налаштування параметрів моделі виконувалося на основі критеріїв, розроблених у теорії автоматичного керування; обробка даних вимірювань при експериментальних дослідженнях виконано в системі Matlab.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

У роботі отримані такі нові наукові результати:

Вперше розроблений та реалізований багатопараметричний спосіб корекції масштабного коефіцієнту КВГ, який може бути використаний при роботі КВГ як у режимі датчика кутової швидкості (КВГ–ДКШ), так і в диференційному режимі (КВГ-ДКШ-Д). На цей спосіб отримано патент.

Вперше був розроблений і проведений науково обґрунтований аналіз нової конструкції циліндричного резонатора з отворами на твірній поверхні циліндру, що має більш високу вібро-ударостійкість.

Розроблений та реалізований алгоритм багатопараметричної корекції дрейфу нуля, що має переваги над існуючими по точності корекції.

Вперше проведені експериментальні дослідження на виготовленому експериментальному зразку КВГ з розробленим металевим циліндричним резонатором із елінварного сплаву, які показали високу точність корекції масштабного коефіцієнту та дрейфу нуля при дії температурного градієнту, а також високу вібро-ударостійкість розробленого зразка.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

– проведено порівняння двох конструкцій металевих циліндричних резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру. Шляхом розрахунків і комп'ютерного моделювання обґрунтовані переваги другого варіанту конструкції над першим у частині вібро-ударостійкості;

– проведено аналіз отворів різної геометрії. Виявлено їх вплив на резонансні частоти коливань циліндричного резонатора. Вироблено рекомендації щодо геометрії резонатора та його елементів;

– удосконалено конструкцію основи, на яку встановлюється новий розроблений резонатор з отворами на твірній поверхні циліндру;

- експериментально обґрунтовано вибір п'єзoeлектродів, що використовуються для збудження коливань і вимірювання сигналів металевого резонатора;
- розроблено методику та обладнання для робочого місця безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення;
- проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі і похибок позиціонування п'єзoeлектродів на зміщення нуля та масштабний коефіцієнт КВГ;
- розроблено конструкцію приладдя для приклеювання п'єзoeлектродів до резонатора нової конструкції;
- розроблено методику та обладнання робочого місця для балансування мас резонатора по четвертій гармоніці дебалансу для зменшення його різночастотності. Методика апробована при виготовленні експериментального зразка КВГ;
- розроблено та реалізовано, при виготовленні експериментального зразка КВГ, методику вимірювання кутів неортогональності осі чутливості до його монтажної поверхні;
- проаналізовано питання використання КВГ для підвищення точності стабілізації блоку озброєння легкоброньованої техніки.
- удосконалено блок-схему алгоритму керування стоячою хвилею КВГ, що забезпечує швидкий старт гіроскопа при його включенні на будь-якій температурі з діапазону робочих температур;
- розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля і масштабного коефіцієнту, що призводить до збільшення точності виміру кутової швидкості в умовах дії температурних градієнтів;
- експериментальні результати показали, що КВГ з металевим резонатором є стійким до дії багаторазових ударів амплітудою 100g, його

зміщення нуля слабо залежить від амплітуди удару та не перевищує  $5 \times 10^{-3}$  град/с. Чутливість зміщення нуля до вібраційних збурень є на рівні  $2,5 \times 10^{-3}$  град/с/g.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальному процесі на кафедрі «Аерокосмічні системи управління» Національного авіаційного університету в навчальній дисципліні «Основи технологій виготовлення пристроїв БСУ» та в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а також – у дослідженнях за тематикою ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» [дод. А].

### **Особистий внесок здобувача**

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних за темою досліджень, плануванні та проведенні експериментів, обробці експериментальних даних та апробації отриманих наукових результатів на наукових конференціях.

Здобувачем був вперше розроблений та відпрацьований на експериментальному зразку КВГ багатопараметричний спосіб корекції масштабного коефіцієнту КВГ. На цей спосіб отримано патент.

Був розроблений і проведений науково обґрунтований аналіз нової конструкції циліндричного резонатора з отворами на твірній поверхні циліндру, що має більш високу вібро-ударостійкість.

Проведено експериментальні дослідження на виготовленому експериментальному зразку КВГ. Розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля.

Розроблено методику та обладнання робочого місця балансування мас резонатора по 4-ій гармоніці дебалансу. Виконані аналітичні розрахунки впливу похибок виготовлення чутливого елементу на зміщення нуля і масштабний коефіцієнт.

За темою дисертації опубліковано такі наукові праці:



1. Petrenko O.V. Temperature correction of the signal phases in a vibratory gyroscope /O.V.Petrenko // Polish journal of science. — Warszawa, Poland, 2019. — №15(1). — PP.30-34.

*Здобувачем запропоновано методикау температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості.*

2. O.Bezvesilna. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system — Kharkiv, 2020. — №1/9(103) 2020. — PP. 39-45.

*Здобувачем проведено визначення динамічної похибки стабілізації стабілізатора озброєння, до складу якого входить Коріолісовий вібраційний гіроскоп.*

3. Петренко О.В. Design analysis and parameters choice of metallic cylindrical resonator sensor for coriolis vibratory gyroscope /О.В. Петренко // Electronics and Control Systems . — NAU, Kyiv, 2014. — №2(40). — PP.87-91.

*Здобувачем проведено розрахунок параметрів та моделювання металевих резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру.*

4. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2019. — №14. — С.103-108.

*Здобувачем надано основні параметри п'єзодатчиків та проведено розрахунок співвідношення між напругами на виході від напруги, яка подається на вхід п'єзодатчиків.*

5. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. — Хмельницький, 2019. — №4(275). — С.169-175.

*Здобувачем побудовано Simulink-модель КВГ, який працює в якості датчика кута.*

6. Петренко О.В. Багатопараметрична модель дрейфу вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2016. — №2. — С.93-97.

*Здобувачем розроблено алгоритм багатопараметричної корекції дрейфу нуля КВГ.*

7. Цірук В.Г. Не ортогональності осі чутливості до монтажної поверхності вібраційного гіроскопа /В.Г. Цірук, О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2017. — №3. — С.158-160.

*Здобувачем проведено розрахунок допустимих величин відхилення осей чутливого елемента відносно монтажної поверхні.*

8. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. — Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2019. — №3(273). — С.158-163.

*Здобувачем проведено оцінку впливу полоси пропускання та дискретності обчислювальних операцій виробів ГТ-46, КВГ, МЕМС та ВОГ на точності характеристики системи стабілізації.*

9. Пат. на винахід 111408 Україна, МПК G01C 19/56. Спосіб компенсації температурної погрішності масштабового коефіцієнта вібраційного гіроскопа / Малярів С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В.; заявник та власник Малярів С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В. — №а201409707; заявл. 04.09.2014; опубл. 25.04.2016, Бюл. №8.

*Здобувачем запропоновано використовувати поліноміальну модель залежності масштабового коефіцієнту від температури, а калібрувальні коефіцієнти обчислювати методом множинної регресії.*

10. Пат. на корисну модель 121394 Україна, МПК G01C 19/56. Вібраційний гіроскоп з компенсацією зміщення нуля / Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В., Крамаренко М.М.; заявник та власник Публічне

акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». — №u201703313; заявл. 06.04.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.

*Здобувачем запропоновано використовувати блок формування швидкості відхилення резонатора від його рівноважного положення для компенсації зміщення нуля КВГ.*

11. Петренко О.В. Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків від температури в складі чутливого елемента вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, В.Г. Цірук // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». — 13-14 квітня, Київ, 2017. — С.56-59.

*Здобувачем проведено вимірювання ємностей п'єзодатчиків в діапазоні температур.*

12. Chikovani V.V. Vibratory gyroscope scale factor multi-parametric calibration /V.V. Chikovani, O.B. Петренко // IEEE 3rd International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)». — 14-17 Oct., NAU, Kyiv, 2014. — PP.129-131.

*Здобувачем запропоновано використовувати поліноміальну модель залежності масштабного коефіцієнту від температури, а калібрувальні коефіцієнти обчислювати методом множинної регресії.*

13. Петренко А.В. Результаты испытаний вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность смещения нуля к внешним вибрациям и ударам /А.В. Петренко // Восьма міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2015)». — 18-19 травня, НАУ, Київ, 2015. — С.300-302.

*Здобувачем проведено оцінку впливу вібраційних та ударних збурень на зміщення нуля КВГ.*

14. Петренко А.В. Балансировка металлического резонатора вибрационного гироскопа /А.В. Петренко // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2017». — 19-21 квітня, НАУ, Київ, 2017. — С.9.46-9.50.

*Здобувачем приведені теоретичні основи балансування металевих резонаторів вібраційних гіроскопів.*

15. Petrenko O.V. Damper for vibratory gyroscope that is used in rigid conditions with mechanical impact /O.V. Petrenko, H.V. Tsiruk // The seventh world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies». — 19-21 Sept., NAU, Kyiv, 2016. — PP.3.3.51-3.3.55.

*Здобувачем розроблено конструкцію демпферів та проведено випробування стійкості КВГ до ударних збурень.*

16. Chikovani V.V. Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy /V.V. Chikovani, O.V. Petrenko, H.V. Tsiruk // The sixth world congress «Aviation in the XXI-st century». — 23-25 Sept., NAU, Kyiv, 2014. — №2. — PP.3.5.34-3.5.38.

*Здобувачем розроблено конструкцію демпферів та проведено випробування стійкості КВГ до ударних збурень.*

17. Петренко О.В. Температурна модель масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015». — 28-29 квітня, Київ, 2015. — С.39.67-39.71.

*Здобувачем розроблено методику корекції масштабного коефіцієнту при зміні температури.*

18. Петренко О.В. Балансування металевого резонатора вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM». — НАУ, Київ, 2018. — С.82.

*Здобувачем наведено теоретичні основи балансування металевих резонаторів.*

19. Безвесільна О.М. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». — 23 Jul., Австрія, Відень, 2019. — №3. — С.44-46.

*Здобувачем описано механічні параметри стабілізаторів озброєння, що впливають на налаштування.*

20. Chikovani V. Features of Design of Coriolis Vibratory Gyroscopes Assigned for Unmanned Aerial Vehicles / Valeriy Chikovani, Olga Sushchenko, O.V. Petrenko and S. Egorov // 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019).— October 22-24, Kyiv, 2019. — PP.194-198

*Здобувачем розроблено конструкцію КВГ з металевим резонатором.*

21. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №9(73). — С.219-226.

*Здобувачем проаналізовано амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики гіротахometrів та визначено смуги пропускання.*

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та одержали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях, семінарах, конгресах:

– III міжнародна конференція «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)» (м.Київ, 14-17 жовтня 2014 р.);

– VI світовий конгрес «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies» (м.Київ 23-25 вересня 2014 р.);

– VIII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015)» (м.Київ, 18-19 травня 2015 р.);

– XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015» (м.Київ, 28-29 квітня 2015 р.);

– VII світовий конгрес «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies» (м.Київ, 19-21 вересня 2016 р.);

– XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (м.Київ, 13-14 квітня 2017 р.);

– XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2017» (м.Київ, 19-21 квітня 2017 р.);

– Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (м.Київ, 21-23 листопада 2018 р.);

– XII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019)» (м.Київ, 21-22 травня 2019 р.);

– Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien» (м.Відень, Австрія, 23 серпня 2019 р.);

– Науково-практична конференція «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій» (м.Ужгород, 28-29 червня 2019 р.);

– Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м.Тернопіль, 9 липня 2019 р.);

– VII науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (м.Київ, 9-10 жовтня 2019р.);

– 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019) (м.Київ, 22-24 жовтня 2019р.).

Також результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету.

**Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів** підтверджено співпадінням аналітичних розрахунків, результатів експериментів та моделюванням на ЕОМ.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 29 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 5 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 2 патенти на корисну модель, 14 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та 4 публікації в інших виданнях.

### **Структура та обсяг дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 166 сторінках основного друкованого тексту. Повний обсяг дисертаційної роботи 218 сторінок друкованого тексту, містить 93 рисунки, 19 таблиць, 6 додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, можливості підвищення точності КВГ, сформульовано мету і завдання, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовано конструкцію основних частин КВГ з металевим резонатором, визначено принципи їх побудови для проведення моделювання. Проведено вибір матеріалу для виготовлення резонаторів КВГ на основі визначення ТКЧ. Проведено аналіз конструкції резонатору КВГ з отворами на його дні у формі «круг» та «трикутник», проаналізовано власні частоти запропонованих конструкцій резонатора комп'ютерним моделюванням та обрано конструкції резонаторів з оптимальними характеристиками. Проведено оптимізацію конструкції резонатора для зменшення чутливості до зовнішніх збурень, змістивши отвори на його твірну циліндричну поверхню. Виконано підбір виконавчих елементів та датчиків системи керування хвилею КВГ шляхом визначення залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури. Проведено розрахунок співвідношення між напругами на вході вимірювальної п'єзокераміки в залежності від напруги, яка подається на вхід

п'єзокерамічного виконавчого елемента на резонансній частоті.

**У другому розділі** проведено перевірку зразків основних параметрів металевого резонатору за допомогою розробленого акустичного методу. Спроектоване спеціальне робоче місце та визначені резонансні частоти, різночастотності, добротності, різнодобротності зразків резонаторів. Проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі похибок позиціонування п'єзокераміки на точність КВГ. Визначено допустимі параметри різночастотності ( $\Delta F \leq 0,01$  Гц) та кута орієнтації хвилі ( $\delta\varphi \leq 2^\circ$ ). Розроблено спеціальне приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора. Проаналізовано вплив похибок, що обумовлені різною жорсткістю, неоднорідністю матеріалу резонатора на основні характеристики КВГ. Розроблено методику та робоче місце балансування металевого резонатора та визначення дебалансу мас по четвертій формі дефекту. Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елемента до монтажної поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка.

**У третьому розділі** розглянуто шляхи підвищення точності систем стабілізації бортових систем навігації та керування рухом. Проведено аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків стабілізаторів, який показав в необхідності заміни роторних гіротахometrів, виконавчих двигунів та підвищення швидкості обробки інформації в цифровому блоці керування. Розроблено базову математичну модель роботи КВГ, як датчика кутової швидкості зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збудженою силою Коріоліса. Розроблено блок-схему управління та описано кожну з її ланок. Розглянуто математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. Розглянуто математичну модель інтегруючого режиму роботи КВГ, коли сила Коріоліса не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. Розроблена повна нелінійна Matlab-Simulink-



модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи та має можливість автоматичного перемикання з режиму на режим.

**У четвертому розділі** розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди, що впливають на зміщення нуля КВГ. Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Розроблено температурну модель масштабного коефіцієнта та запропоновано новий метод компенсації його температурної похибки. Розроблено методики паспортизації основних параметрів КВГ: діапазон вимірювання кутових швидкостей, повторюваність МК, нелінійність МК, стабільність зміщення нуля, повторюваність зміщення нуля від включення до включення, випадковий ухід як в нормальних умовах, так і в діапазоні температур. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації та ударів.

**У загальних висновках** сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

**У додатках** представлені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, матеріали патентів, свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

## РОЗДІЛ 1

### ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ РЕЗОНАТОРОМ

#### 1.1. Принцип дії Коріолісового вібраційного гіроскопа

Принцип роботи Коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ) оснований на управлінні двома стоячими хвилями в фізичному тілі – резонаторі, який може бути як осесиметричним, так і не симетричним до осі. При цьому, осесиметрична форма резонатора дозволяє досягти вагомих характеристик гіроскопа.

Резонатор функціонує в режимі другої форми коливань. Таким чином, стоячі хвилі – це коливання еліптичної форми з чотирма пучностями і чотирма вузлами, що розташовані по окружності края резонатора. Кут між суміжними вузлами/пучностями дорівнює 45 градусам. Еліптична форма коливань збуджується до певної амплітуди. Коли гіроскоп повертається навколо осі чутливості, результуючі Коріолісові сили, що впливають на елементи вібруючої маси резонатора збуджують другий режим коливань. Кут між головними осями двох режимів складає 45 градусів (рис.1.1).

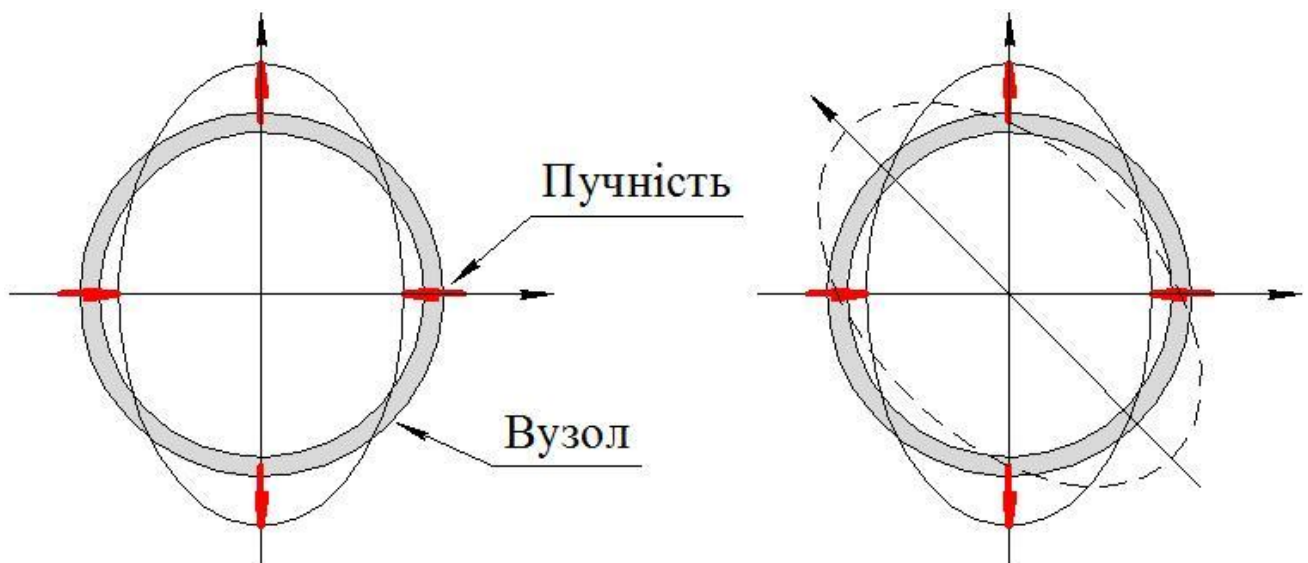


Рис.1.1. Форми коливань резонатора КВГ

Замкнутий контур управління зводить другий режим коливання до нуля. Сила, що необхідна для цього, – пропорційна швидкості обертання датчика. Відповідна система замкнутого контура управління називається компенсаційною. Для генерування компенсаційної сили і зчитування інформації, використовуються п'єзоелектричні елементи, що закріплені на резонаторі. Подібна електромеханічна система досить ефективна і забезпечує низький рівень шуму вихідного сигналу і широкий діапазон вимірювання, що необхідний у багатьох галузях застосування.

## **1.2. Аналіз конструкції та вибір параметрів чутливого елементу КВГ**

КВГ з металевим резонатором конструктивно складається із наступних основних складових частин:

Чутливий елемент (ЧЕ):

– генератор коливань:

- резонатор;
- п'єзодатчики;
- основа;
- гермовиводи;

– кріпильні деталі;

– штенгель;

– ковпак.

Електронні блоки:

– плата живлення;

– буферна плата;

– плата цифрової обробки.

Корпусні та кріпильні деталі.

Дослідні моделі деталей основних вузлів КВГ для моделювання представлені на рис.1.2–1.5[1].



Рис.1.2. Металевий резонатор з приклеєними п'єзодатчиками

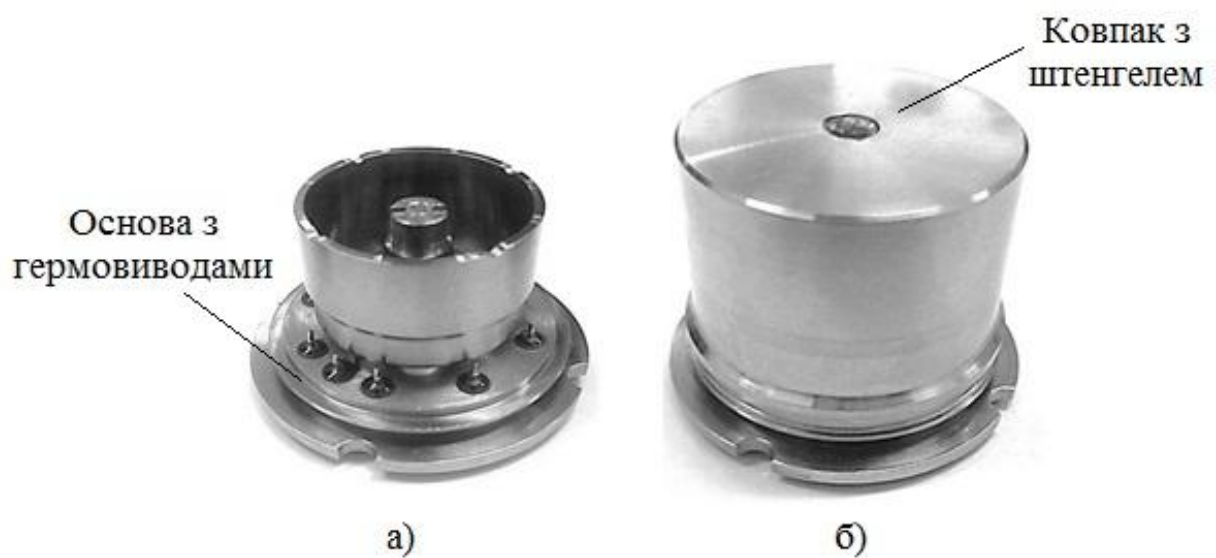


Рис.1.3. Генератор коливаль (а) та чутливий елемент (б) КВГ



Рис.1.4. Електронні блоки КВГ

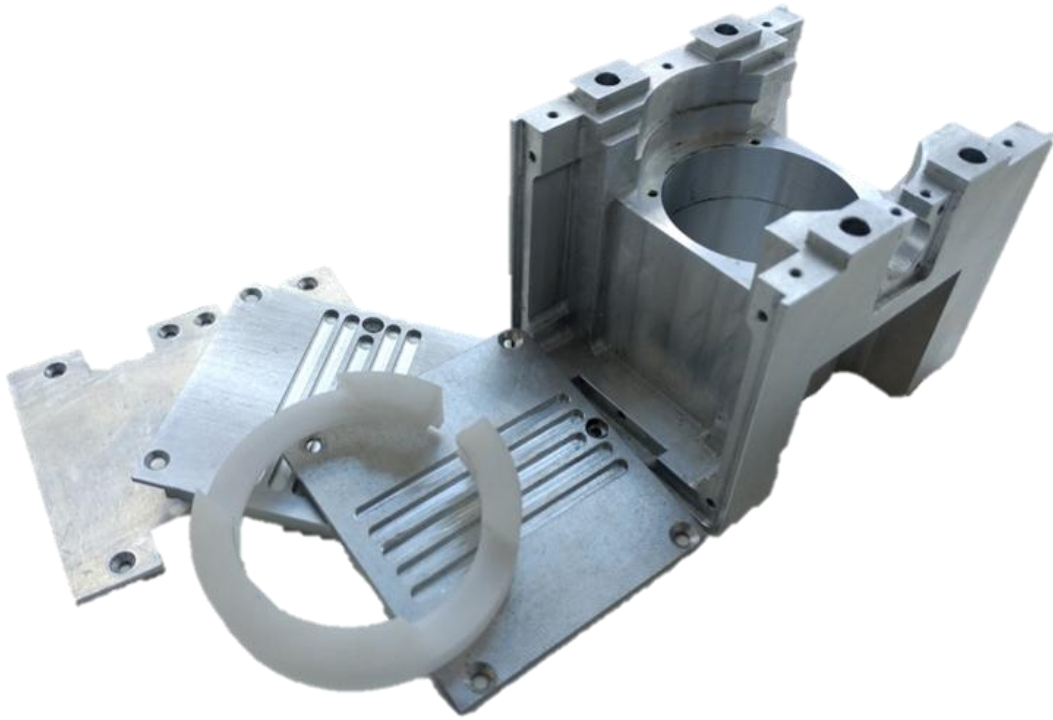


Рис.1.5. Корпусні деталі КВГ

Правильний вибір параметрів кожного елементу та оптимізація їх конструкції призводить до покращення вихідних характеристик виробу в цілому [2–5].

### 1.2.1. Вибір матеріалу резонатора

Вибір марки сплаву, застосовуваного для пружних чутливих елементів, є важливою задачею.

Сплав, з якого має виготовлятися резонатор має задовольняти наступним властивостям:

- висока стабільність модуля пружності (ТКМП,  $\gamma$ );
- мінімальний температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ,  $\beta$ );
- мінімальний температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР,  $\alpha$ ).

Ці три параметри пов'язані наступною залежністю:

$$\gamma = 2\beta - \alpha. \quad (1.1)$$

Стабільність модуля пружності досягається за рахунок наближення до нуля рівності  $2\beta - \alpha$  та забезпечує малу температурну похибку приладу в умовах експлуатації.

Для вибору оптимального матеріалу для резонатора було обрано наступні марки сплавів: 21НКМТ, 03Н18К9М5Т, С300 та 44НХТЮ. Хімічний склад сплавів наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

## Хімічний склад матеріалів резонатора

Сплав	21НКМТ	03Н18К9М5Т	С300	44НХТЮ
Al	$\leq 0,2$	$\leq 0,15$	0,1	0,4-0,8
C	$\leq 0,03$	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,05$
Co	8,5-9,5	8,5-9,5	8,5	-
Cr	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	0	5-5,6
Fe	Осн.	Осн.	Осн.	44,1-48,3
Mn	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0,3-0,6
Mo	4,5-5,5	4,6-5,5	4,8	-
Ni	20,5-21,5	20,5-21,5	18,5	43,5-45,5
P	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,02$
S	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,02$
Si	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0,3-0,6
Ti	0,6-0,9	0,6-0,8	0,6	2,2-2,7
Інші домішки	Ітрій 0,01		Цирконій 0,01 Бор 0,003	

Елінварні сплави на основі системи Fe-Ni (44НХТЮ) добре відомі, як матеріали з низьким і відносно стабільним значенням температурного коефіцієнту лінійного розширення та пружними властивостями [6].

Низьке значення ТКЛР в елінварних сплавах забезпечило їм широке застосування в техніці і промисловості, в тих галузях, де велике значення має температурна стабільність лінійних розмірів виробів чи їх окремих частин.

Сплави 21НКМТ, 03Н18К9М5Т, С300 також володіють елінварними властивостями після термообробки, а по рівню міцності та пружних властивостей значно перевищують сплав 44НХТЮ.

Так, виготовлені резонатори ідентичної конструкції із цих матеріалів мають різний рівень добротності після проведення термообробки та

електрохімічної поліровки. Добротність резонаторів із сплаву 21НКМТ та 03Н18К9М5Т складає  $\approx 18000$ , сплаву С300  $\approx 21000$ , а із сплаву 44НХТЮ  $\approx 8000$ .

На рис.1.6. представлено графік залежності резонансної частоти резонатора, виготовленого із матеріалу С300, від температури.

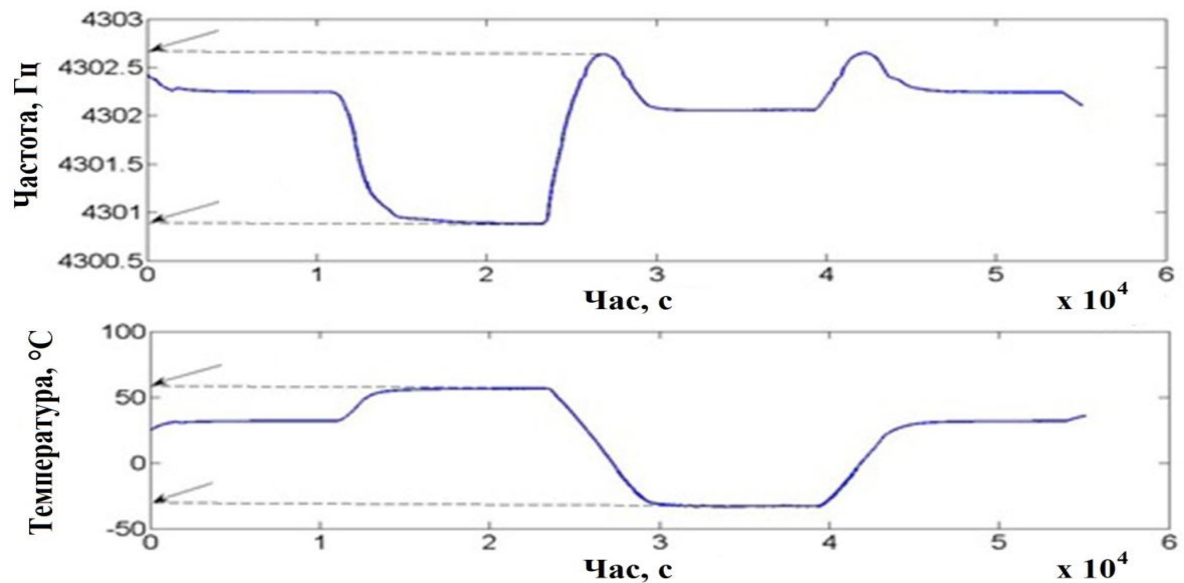


Рис.1.6. Графік залежності резонансної частоти резонатора, виготовленого із матеріалу С300, від температури

Графік залежності резонансної частоти резонатора, виготовленого із матеріалу 03Н18К9М5Т, від температури представлено на рис.1.7.

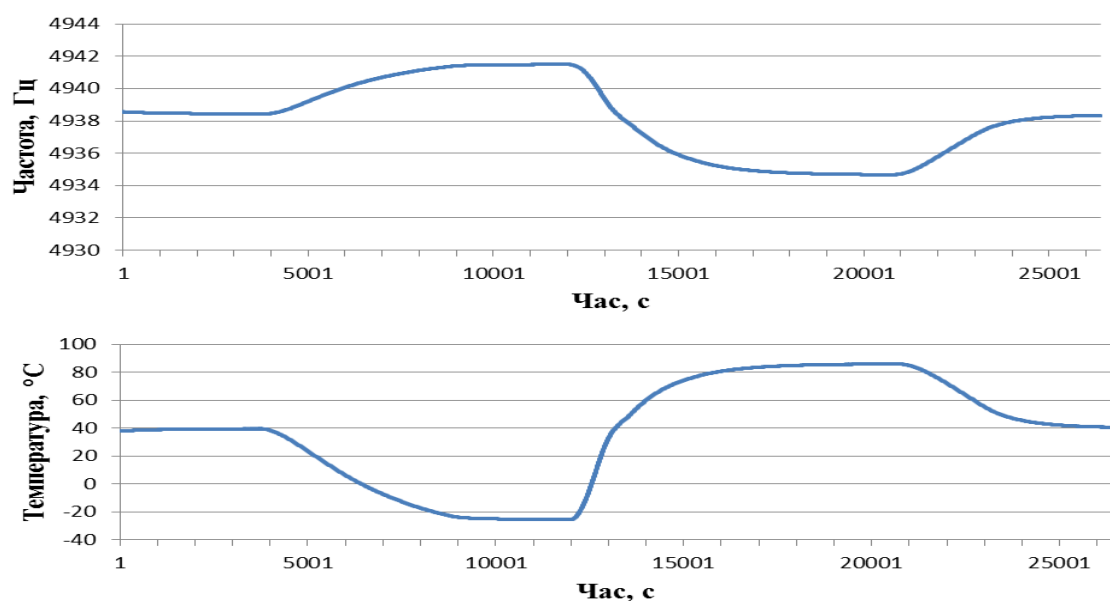


Рис.1.7. Графік залежності резонансної частоти резонатора, виготовленого із матеріалу 03Н18К9М5Т, від температури

Проведемо розрахунок ТКЧ для кожного із резонаторів за формулою:

$$\beta = \frac{1}{F_p} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta T}, \quad (1.2)$$

де  $F_p$  – резонансна частота при нормальних кліматичних умовах,  $\Delta F$  – зміна частоти при зміні температури  $\Delta T$ .

Для резонатора, виготовленого із матеріалу С300  $\beta = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , а для матеріалу 03Н18К9М5Т  $\beta = 12,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

Як видно з показників добротності та ТКЧ для проектування та виготовлення резонаторів доцільно використовувати мартенситно-старіючі сплави з особливими режимами термообробки. Розрахунки по графікам, представленим на рис.1.6 та рис.1.7, показують, що для резонатора діаметром 25 мм, виготовленого зі сплаву С300, чутливість частоти до температури дорівнює 0,016 Гц/°С, а зі сплаву 03Н18К9М5Т – 0,06 Гц/°С. Для обох сплавів ця чутливість в 5-10 разів менше, ніж для плавненого кварцу.

### 1.2.2. Аналіз конструкції резонатора

З метою забезпечення високої точності гіроскопа, конструкція резонатора повинна бути такою, яка забезпечує ідентичність мод коливань (первинної та вторинної), так як у цьому випадку забезпечується максимальні чутливість та точність. Крім того, конструкція повинна мати сувору осесиметричність. Існують дві геометричні фігури, які мають високу осесиметричність: сфера і циліндр[7]. Використовуються також вібраційні гіроскопи з металевим резонатором у вигляді спареного камертону (чотири балки квадратного перетину на одній основі, встановленої на короткій ніжці).

Сфера або напівсферична оболонка володіють максимальною осесиметричністю, тому на основі саме напівсферичної оболонки створюються напівсферичні кварцеві КВГ, які в іноземній літературі скорочено називають HRG (Hemispherical Resonator Gyroscope) [8–13].

Резонатор такого гіроскопа має добротність близько 5 – 10 мільйонів і збуджується електростатичними (безконтактними) електродами [14, 15]. Такий



резонатор не є технологічним і, як наслідок, досить дорогий у виробництві, його важко відбалансувати, а для балансування необхідне складне обладнання.

Для збільшення технологічності і зменшення вартості виготовлення резонатора його слід виготовляти з металу. Однак, метал має невисоку, в порівнянні з кварцом, добротність і його практично неможливо збудити електростатичними силами, так як вони занадто слабкі. Інші перспективні електроди, які можуть вимірювати мікронні переміщення – п'єзокерамічні електроди. П'єзoeлектроди клеються на резонатор. Якщо їх наклеїти на робочу вібруючу частину резонатора (на його обід), то добротність резонатора впаде у декілька разів (до 10 разів). Крім того, п'єзoeлектроди не можна клеїти на сферичну поверхню, так як при цьому виникають початкові збуджуючі деформації і потенціали, що негативно впливають на точність приладу. Тому, для металевого резонатора недоцільно використовувати напівсферичну геометрію, в якій немає плоских частин, а слід використовувати циліндричну геометрію, а електроди клеїти на плоске дно циліндра.

У циліндричній конструкції є дві переваги: по-перше, електроди клеяться на плоску поверхню і, по-друге, електроди розташовані на максимальному віддаленні від робочої вібруючої частини циліндра і, отже, мінімально впливають на добротність. Для збільшення передачі енергії коливань на дно циліндра слід передбачити збільшення товщини обода щодо його дна, а для зменшення впливу розтягуючих (дотичних) зусиль, що діють з боку пучностей на вузли коливань, слід виконати отвори на дні циліндра, що розривають механічний зв'язок між вузлами і пучностями [16].

Отвори можуть бути круглі, овальні або іншої форми, але такими, щоб між ними утворювалися спиці, на яких кріпляться датчики збудження і знімання інформації (рис.1.8) [17–19]. Електроди знімання інформації можуть бути ємнісні, оптичні, електромагнітні або інші, але доцільно і технологічно їх робити уніфіковані. Якщо електроди збудження п'єзокерамічні, то в якості електродів знімання, для збереження балансу мас і уніфікації, їх слід також робити п'єзокерамічними.

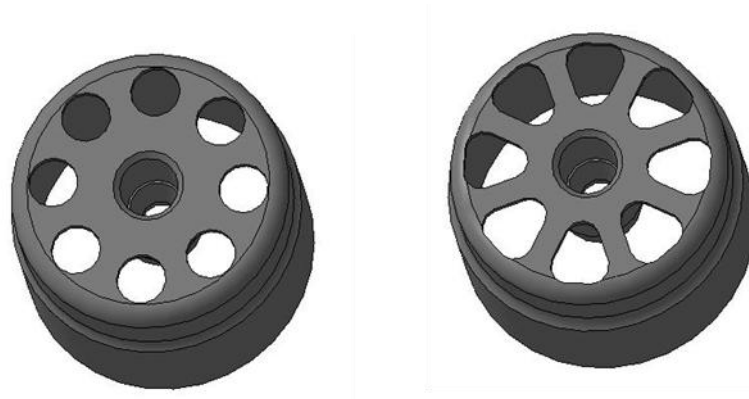


Рис.1.8. Форми отворів на дні резонатора

На дні циліндра виконується вузол кріплення резонатора на основу у вигляді конусоподібної конструкції вивернутої всередину чутливого елемента. Центр мас резонатора повинен збігатися з геометричним центром конуса. Основа має виступаючу частину, на кінці якої виконують відповідну конусоподібну форму для кріплення резонатора на основу методом конусної посадки (рис.1.9) [20].

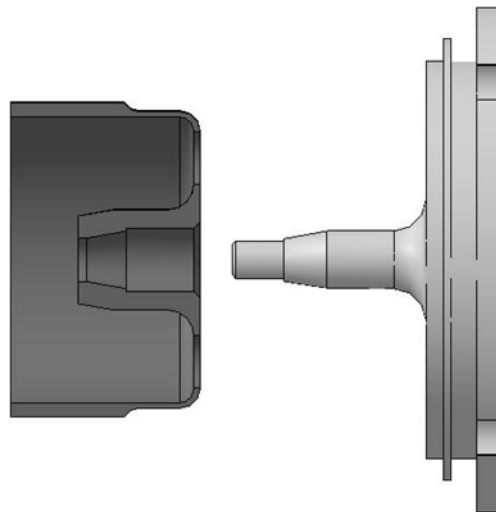


Рис.1.9. Посадка резонатора на основу

Проведемо розрахунок конструкції резонатора з урахуванням вище зазначених вимог.

### 1.2.3.Розрахунок конструкції резонатора

Для розрахунку конструкції резонатора скористаємося схематичним кресленням, представленим на рис.1.10.

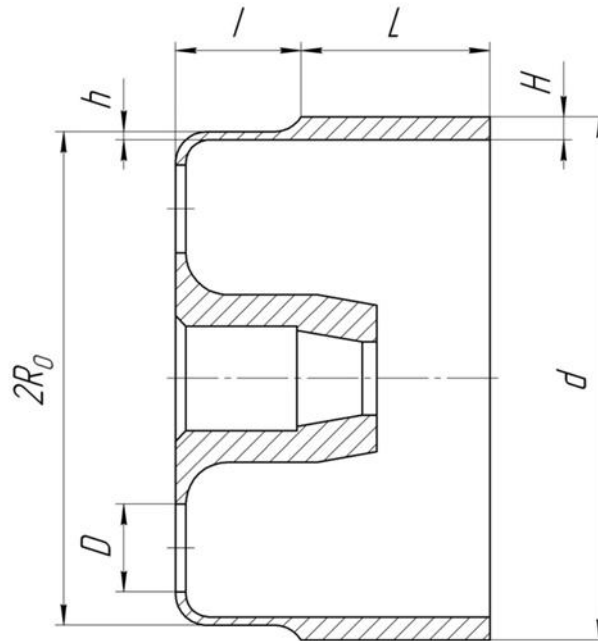


Рис.1.10. Циліндричний резонатор

Оскільки товщина циліндричної частини пружного підвісу менше товщини обода  $h < H$ , то його власна частота зміщена в більш низький діапазон частот. Це видно з виразу для резонансної частоти циліндричної оболонки:

$$F_i = K(i) \frac{h}{R_0^2} \sqrt{\frac{E}{(1 + \nu)\rho}}, \quad (1.3)$$

Де  $K(i) = \frac{i(i^2 - 1)}{\sqrt{i^2 + 1}}$  – коефіцієнт, що залежить від  $i$ -ї моди коливань,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\rho$  – густина матеріалу.

В результаті цього досягається частотна розв'язка між робочою частотою коливань (резонансною частотою обода) і частотою підвісу (нижньою частиною циліндра), на якій розташований обід. Тому пружний підвіс в такій конструкції виконує роль демпфера при дії зовнішніх збурень – вібрацій та ударів. Крім того, параметри пружного підвісу вибирають так, щоб його частота була вищою максимальної частоти в спектрі діючих зовнішніх збурень, який знаходиться, як правило, в діапазоні частот до 2000 Гц.

Зменшення товщини пружного підвісу призводить до зменшення його моменту інерції  $i$ , тим самим, знижує вимоги до точності виготовлення та до рівності пружних властивостей спиць. Це видно зі співвідношення моментів

інерції кільцевого обода  $M_k$  і підвісу  $M_{пд}$ , наведених до амплітуди коливань резонатора:

$$\frac{M_{пд}}{M_k} = \left(\frac{h}{H}\right)^2. \quad (1.4)$$

Тому при виконанні співвідношення  $\frac{h}{H} \leq \frac{1}{4}$  вимоги до точності виконання пружного підвісу зменшуються (послаблюються) більш, ніж на порядок. Високі вимоги до точності геометричної форми і пружних властивостей накладаються тільки на обід резонатора, що значно підвищує технологічність і, отже, знижує вартість його виготовлення.

Дно резонатора і менша за товщиною нижня частина циліндра виконує роль пружного підвісу, але оскільки на дні розташовуються датчики знімання і збудження, які збільшують жорсткість по осях їх розташування, то для забезпечення коливань резонатора по цих осях необхідно збільшити жорсткість частини дна між датчиками. Однак, між п'єзодатчиками розташовані отвори, тому порівняємо жорсткості уздовж осі спиць і осі, що проходить через центр отвору. Жорсткість спиць, які утворюються між отворами, дорівнює:

$$C_{сп} = \frac{Eh^3}{12R_0^2}, \quad (1.5)$$

а жорсткість дна вздовж осі, що проходить через центри отворів діаметром  $D$  (рис.1.10), для круглих отворів дорівнює:

$$C_z = \frac{Eh^3}{12(R_0 - D)^2}. \quad (1.6)$$

Для того, щоб максимальні коливання збуджувалися уздовж осей, де розташовані п'єзодатчики, необхідно виконати умову:

$$\frac{C_{сп}}{C_z} < 1. \quad (1.7)$$

Жорсткість п'єзодатчиків визначається за формулою:

$$C_n = \frac{E_n b h_n^3}{12a^3}, \quad (1.8)$$

де  $b$ ,  $a$ ,  $h_n$  – ширина, довжина та товщина п'єзопластини,  $E_n$  – модуль Юнга п'єзопластини.

Сумарна жорсткість спиці та розташованій на ній п'єзопластини, при відношенні розмірів,  $a = \frac{R_0}{2}$ ,  $h_n = h$  дорівнює:

$$C_\Sigma = \frac{Eh^3}{12R_0^2} \left( 1 + \frac{8E_nb}{ER_0} \right). \quad (1.9)$$

Для виконання умови (1.7) потрібно, щоб  $C_\Sigma/C_z < 1$ , або

$$\left( 1 - \frac{d}{R_0} \right)^2 \left( 1 + \frac{8E_nb}{ER_0} \right) < 1. \quad (1.10)$$

Умова (1.10) виконується при  $D \geq \frac{R_0}{2}$ . Таким чином, якщо діаметр отвору буде більше половини радіуса циліндра, то деформація дна циліндра зосередиться на спицях і буде виміряна п'єзодатчиками.

#### 1.2.4. Моделювання конструкції резонатора

Моделювання конструкції резонатора проводилося за допомогою програми ProENGINEER, яка дозволяє оцінити його власні резонансні частоти.

Конструкція резонатора і форма отворів («вікон») в його дні вважається оптимальною, якщо його власні резонансні частоти рознесені більш ніж на 800 Гц.

Варіанти типів резонаторів для моделювання наведені у таблиці 1.2. Параметри резонатора:  $2R_0 = 23,6$  мм,  $h = 0,4$  мм, решта згідно з таблицею 1.2. Під формою отворів «круг» і «трикутник» мається на увазі конфігурації, представлені на рис.1.11.

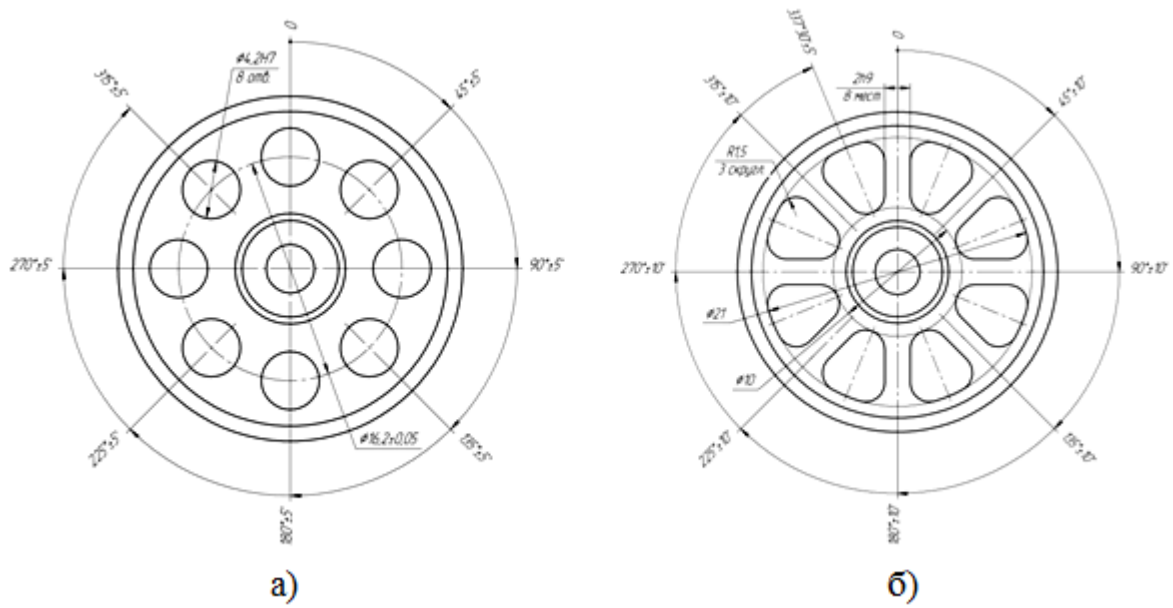


Рис.1.11. Форма отворів на дні резонатора а) – «круг» та б) – «трикутник»

Інші форми отворів не розглядалися в зв'язку з їх не технологічністю.

Таблиця 1.2

Типи резонаторів для моделювання

№ п/п	$d$ , мм	$H$ , мм	$L$ , мм	$I$ , мм	Форма отворів на дні
1	25	1,1	11	8	Круг
2	25	1,1	11	8	Трикутник
3	24,6	0,9	11	8	Круг
4	24,6	0,9	11	8	Трикутник
5	25,4	1,3	11	8	Круг
6	25,4	1,3	11	8	Трикутник
7	25	1,1	10	7	Круг
8	25	1,1	10	7	Трикутник
9	24,6	0,9	10	7	Круг
10	24,6	0,9	10	7	Трикутник
11	25,4	1,3	10	7	Круг
12	25,4	1,3	10	7	Трикутник
13	25	1,1	9	6	Круг
14	25	1,1	9	6	Трикутник
15	24,6	0,9	9	6	Круг
16	24,6	0,9	9	6	Трикутник
17	25,4	1,3	9	6	Круг
18	25,4	1,3	9	6	Трикутник

Власні резонансні частоти резонаторів в діапазоні 1000 ÷ 12000 Гц наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

## Власні резонансні частоти резонаторів

№ резонатора п/п	$F_1$ , Гц	$F_2$ , Гц	$F_3$ , Гц	$F_4$ , Гц	$F_5$ , Гц
1	1041,7	2618,4	<b>5163,5</b>	5446	
2	2160	4168,4	<b>5154,1</b>	10736,8	
3	1151,3	2848,2	<b>4321,3</b>	5952,2	11521,1
4	2345,1	<b>4310,9</b>	4560,8	11417,9	11487
5	2432	4885,3	<b>5947</b>	10783,2	
6	2021,2	3795,4	<b>5940,7</b>	9737,7	
7	1173,6	2726,2	<b>5277,3</b>	5826,8	
8	2261,3	4423,6	<b>5263,9</b>	11002,2	
9	1296,8	2959,1	<b>4427,1</b>	6448,5	11703,3
10	1060,3	2460,2	<b>4412,3</b>	4845,1	11671,5
11	1086,6	2574,4	5394,3	<b>6096,5</b>	11791,1
12	2117,3	4092,9	<b>6074</b>	10376,2	
13	1334,4	2892,3	<b>5440,6</b>	6339,1	
14	1100,1	2400	4756,1	<b>5421,2</b>	11432,6
15	1479,5	3129,4	<b>4577,6</b>	6928,4	11970,1
16	1218,4	2608,6	<b>4559,7</b>	5210,8	11917,1
17	1215,2	2661,4	5782,4	<b>6270,3</b>	
18	1007,2	2227,9	4360,4	<b>6242,4</b>	10622,9

Резонансні частоти, що відповідають за другу моду коливань, відзначені жирним шрифтом. Як видно з даних таблиці 1.3, найбільш підходящу конструкцію мають резонатори №3, №5, №6, №9, №12, №15, №18. Різниця власних частот вважається прийнятною в резонаторах №2, №8, №11, №13. Резонатори №1, №4, №7, №10, №14, №16, №17 застосовувати в якості чутливого елемента не рекомендується.

### 1.2.5. Оптимізація конструкції резонатора

У представленій вище конструкції є ряд недоліків. Коливання стінок циліндра передаються на його дно з коефіцієнтом передачі значно меншим одиниці. Це означає, що якщо амплітуда коливань обода дорівнює, наприклад,

1 мікрон, то амплітуда коливань спиці, розташованої на дні циліндра дорівнює 0,05 мікрон, тобто менше в 20 разів (коефіцієнт передачі дорівнює  $1/20$ ). В результаті цього чутливість і точність гіроскопа падає. Крім того, при дії зовнішньої вібрації вздовж осі чутливості (ВЧ) гіроскопа, тобто перпендикулярно дну циліндра, на тонкі і вузькі спиці діє велике навантаження від важкого, більш товстого обода. В результаті цього поперечна деформація тонкої спиці, до якої кріпиться п'єзодатчик, створює значні похибки, що пропорційні зовнішній вібрації [21].

Для підвищення чутливості, точності гіроскопа при вимірюванні кутової швидкості і зменшення чутливості до зовнішньої вібрації при роботі, отвори виконуються на твірній поверхні циліндра, а спиці, що утворилися в результаті виконання отворів шліфуються для отримання плоскої поверхні під кріплення п'єзодатчиків (рис.1.12) [22].



Рис.1.12. Форми отворів на твірній поверхні циліндра резонатора

При цьому, співвідношення між товщиною, висотою кільцевого елемента, висотою спиць і товщиною дна циліндра, вільних від п'єзодатчиків, підбираються таким чином, щоб їх власні частоти коливань (кільцевого резонатора, спиць і дна) були рознесені, мінімізуючи їх взаємний вплив.

При дії зовнішніх збурень вздовж осі симетрії резонатора (уздовж осі чутливості гіроскопа), навантаження на спиці діє уздовж поздовжньої її осі. Жорсткість спиці по поздовжній осі значно більше, ніж поперечна жорсткість спиць в конструкції, зазначеної на рис.1.8.



Для простоти припустимо, що спиця в нижній частині циліндра і спиця на дні циліндра мають однакову форму балки прямокутного поперечного перерізу, тоді поперечна жорсткість спиці (балки),  $K_x$ , дорівнює:

$$K_x = \frac{Ewh^3}{4l^3}, \quad (1.11)$$

де  $E$  – модуль Юнга матеріалу;  $w$  – ширина спиці;  $h$  – товщина спиці;  $l$  – довжина спиці.

Поздовжня жорсткість спиці (балки),  $K_y$ , дорівнює:

$$K_y = \frac{Ewh}{l}. \quad (1.12)$$

Для діаметра резонатора 25 мм розміри балки можуть бути приблизно рівні наступним значенням:  $w = 3$  мм,  $h = 0,4$  мм,  $l = 6$  мм, тоді для поздовжньої і поперечної жорсткості отримаємо, відповідно:  $K_y = 0,15E$ ,  $K_x = 7,4 \times 10^{-5}E$ . Таким чином, жорсткість такої спиці приблизно в  $\frac{K_y}{K_x} \approx 2 \times 10^3$  раз більше, ніж жорсткість спиці в конструкції, представленої на рис.1.8. Значна різниця в жорсткості спиць, призводить до значно меншим (в 2000 разів) амплітудам згинальних коливань спиць при дії зовнішніх механічних збурень в резонаторах з приклеєними п'єзодатчиками на твірну поверхню циліндра, ніж в резонаторах з приклеєними п'єзодатчиками на його дні.

Для моделювання була розроблена конструкція резонатора з параметрами, представленими на рис.1.13.

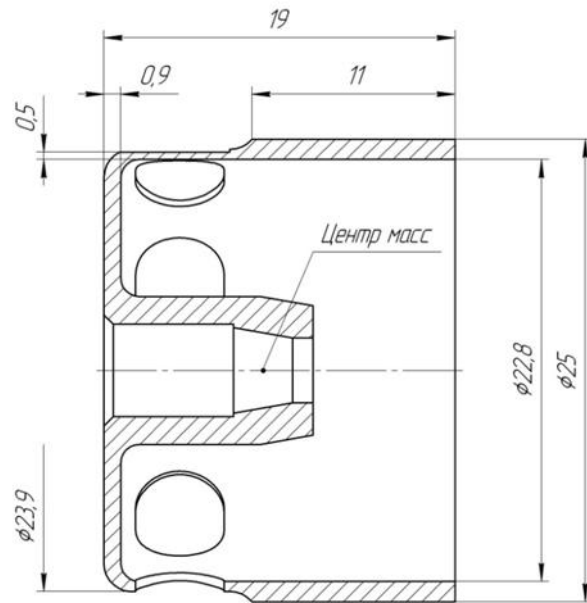


Рис.1.13. Основні конструкційні розміри резонатора зі спицями на твірній поверхні циліндра

Результати моделювання резонаторів різної конфігурації приведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Власні резонансні частоти резонаторів

№	Конструкція резонатора	Геометрія спиці та отвору	$F_1$ , Гц	$F_2$ , Гц	$F_3$ , Гц	$F_4$ , Гц	$F_5$ , Гц
1	2	3	4	5	6	7	8
1		Ширина спиці 2 мм Висота отвору 5,2 мм	1951,7	4103,7	<b>5167,5</b>	5352,2	8928,5
2		Ширина спиці 2 мм Висота отвору 5,2 мм	1998,9	4222,5	<b>5226,4</b>	6013,3	11121,7
3		Ширина спиці 2 мм Висота отвору 4,8 мм	2023,8	4318,7	<b>5238,1</b>	6070,3	11371,2

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8
4		Ширина спиці 2,2 мм Висота отвору4,8 мм	2034,9	4283,4	<b>5225,9</b>	6123,1	11565,4
5		Ширина спиці 2,4 мм Висота отвору 4,8 мм	2048	4311,4	<b>5144,8</b>	6182,8	11933,6
6		Ширина спиці 2,2 мм Висота отвору 4,8 мм Висота циліндра10 мм	2169,9	4421,2	<b>5269,6</b>	5352,2	8928,5

Моделювання конструкції резонатора проводилося за допомогою програми ProENGINEER, яка дозволяє оцінити його власні резонансні частоти.

Конструкція резонатора вважається оптимальною, якщо його власні резонансні частоти рознесені більш ніж на 800 Гц.

Як видно з даних таблиці 1.4, отвори в резонаторах таких типів повинні бути виконані у формі, наближеної до овалу. Така форма отвору і збільшення ширини спиці веде до рознесення його власних частот. Резонатори №2, №3, №4, №5 можуть бути використані в якості чутливих елементів.

#### 1.2.6. Конструкція чутливого елементу КВГ

Вузол кріплення резонатора на основу виконується аналогічно конструкції, представленої на рис.1.9.

Для передачі сигналів на п'єзокерамічні пластини збудження резонатора і компенсації Коріолісової сили при виникненні кутової швидкості, а також тих, що надходять від п'єзокерамічних пластин вимірювання амплітуд вузла і пучності в чутливому елементі використовуються гермовиводи.

Втулка гермовивода виготовляється зі сплаву 29НК (ковар), ТКЛР якого дорівнює ТКЛР скла С52-1 і становить  $5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Основа, в яку вклеюється вивід герметичний виготовлена зі сплаву 44НХТЮ, який має ТКЛР  $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (рис.1.14). Оскільки надійний склоспай можливий тільки при рівності ТКЛР сполучених матеріалів конструкції і самого скла, то застосування такого матеріалу для виготовлення основи може призвести до виникнення тріщин в склі при перепадах температур і призвести до порушення вакууму всередині чутливого елемента.

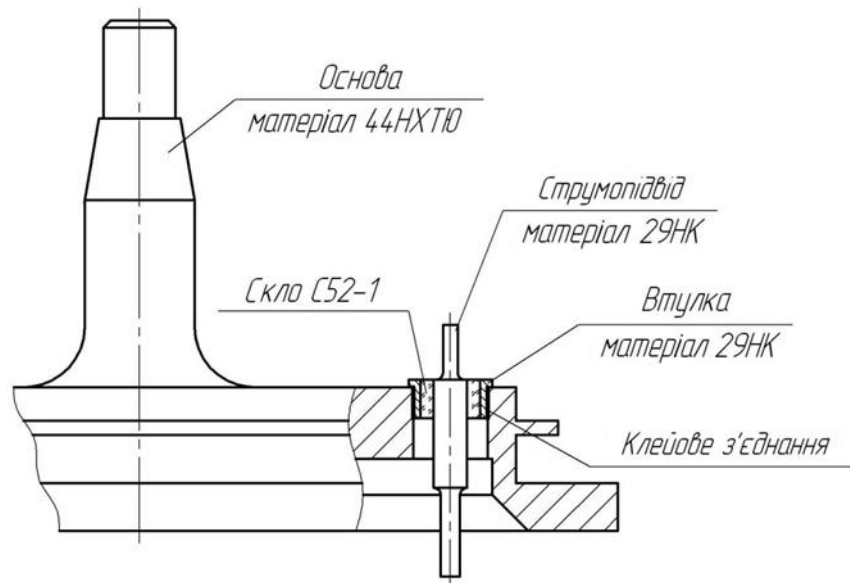


Рис.1.14. Конструкція основи з використанням стандартного гермовивода

Особливістю конструкції нової основи є її виготовлення з матеріалу 29НК. Це дозволить позбутися клейового з'єднання і зробити склоспай гермовиводів безпосередньо з основою без втулки гермовивода. Конструкція такої основи представлена на рис.1.15.

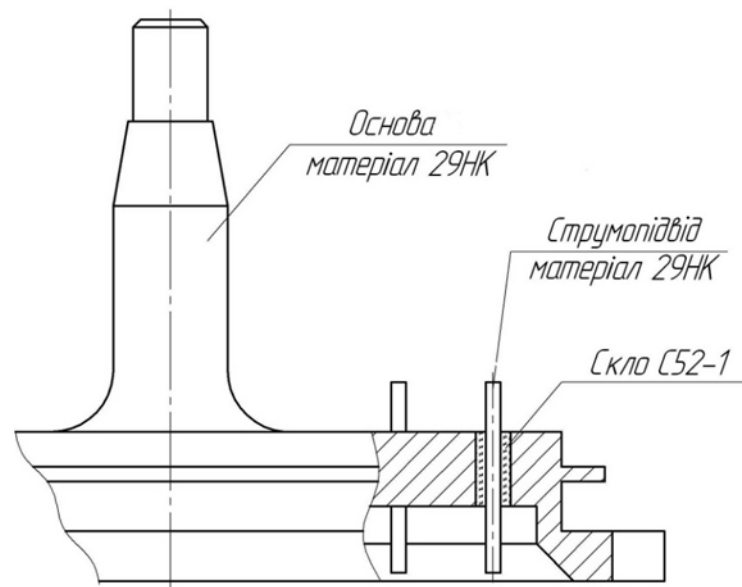


Рис.1.15. Конструкція основи ЧЕ з використанням склоспаю

В резонаторах з перемичками на циліндричній поверхні п'єзодатчики можуть кріпитися по всій довжині перемички або тільки у верхній її частині, тільки в нижній її частині, а також поперемінно у верхній і нижній частинах.

При проектуванні генератора коливань п'єзодатчики приклеювалися по всій довжині перемички. Провід припаюється до нижньої частини п'єзодатчика і до струмопідводу гермовивода (рис.1.16).

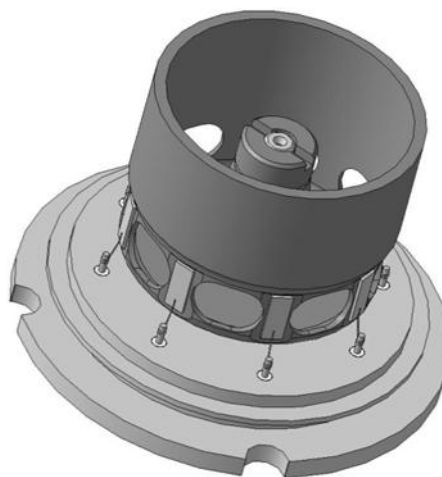


Рис.1.16. Конструкція генератора коливань

Для забезпечення якісного лазерного зварювання основи та ковпака, деталь Ковпак також виготовляється зі сплаву 29НК. Вакуумування внутрішньої порожнини чутливого елемента виконується через штенгель з

вакуумної міді МВ-И-Т. Після досягнення вакууму  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па, перетискується і зрізається технологічна частина штенгеля спеціальним інструментом і обпаюється торець, що залишився. Конструкція чутливого елемента представлена на рис.1.17.

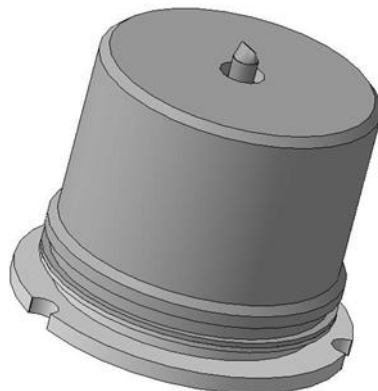


Рис.1.17. Конструкція чутливого елемента

Використання чутливого елемента з отворами на твірній частині циліндра та конусною посадкою на основу, виготовлену із матеріалу 29НЖ, дозволить підвищити точність виробу, а також зменшити чутливість до зовнішніх збурень.

### **1.3. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею вібраційного гіроскопа**

Виконавчими та вимірювальними елементами (електродами) системи керування хвилею КВГ, які використовують металеві резонатори, є п'єзокерамічні пластини [23], що володіють прямим та зворотним п'єзоефектами.

Прямий п'єзоефект – в результаті застосування зовнішньої сили виникає механічна напруга в п'єзокераміці, яка зміщує позитивно і негативно заряджені елементи кристалічної решітки і з'являється потенціал між електродами, які наносяться на протилежні поверхні пластини.

Зворотний п'єзоефект – додаток електричної напруги до електродів п'єзокерамічного матеріалу призводить до деформації матеріалу. Величина деформації залежить від величини прикладеної напруги і напрямків поляризації

матеріалу. При додатку змінної напруги генеруються циклічні зміни геометрії незакріпленої пластини. Якщо пластина закріплена, то виникає механічна сила, що діє на відповідні зв'язки.

Ці пластини приклеюються на резонатор, до них припаюються провідники, через які подаються напруги і знімаються заряди, що в буферному каскаді перетворюються в напруги.

При прикладанні періодичної напруги до п'єзодатчиків збудження на резонансній частоті в резонаторі КВГ формується стояча вібраційна хвиля (первинна хвиля). При обертанні резонатора з кутовою швидкістю  $\Omega$  виникає сила Коріоліса, яка збуджує коріолісову (вимірювану) моду коливань (вторинна хвиля) (рис.1.18).

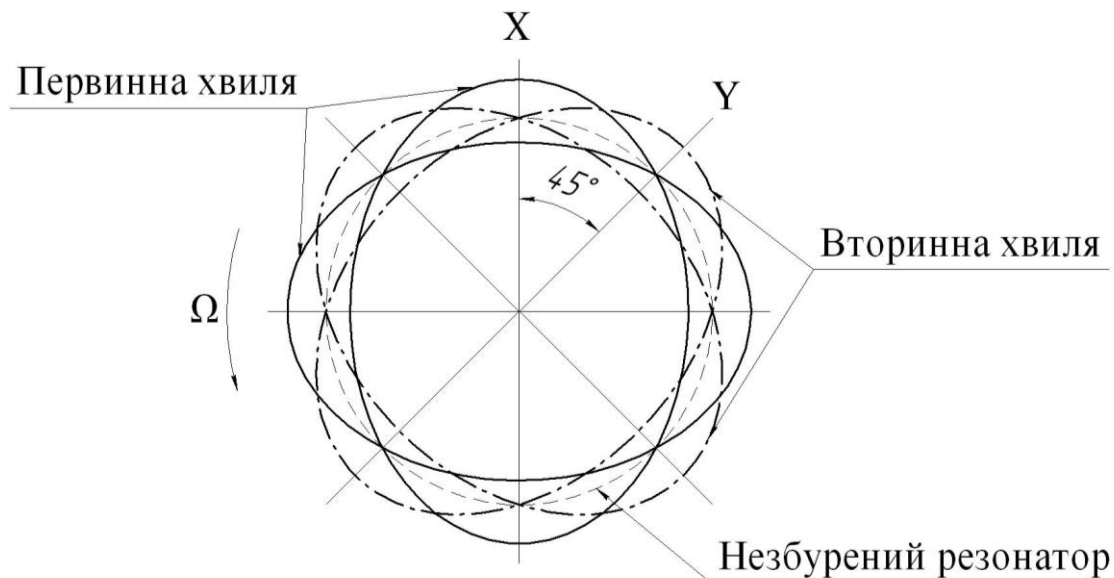


Рис.1.18. Первинна та вторинна хвилі резонатора

П'єзоелектричні матеріали умовно можна розділити на дві групи[23, 24]:

1. П'єзоелектричні монокристали. Природні п'єзоелектричні матеріали мають досить високу вартість. У зв'язку з цим, потреби електроніки, в даний час, задовольняються синтетичними п'єзоелектричними монокристалами, які вирощуються у спеціальних установках. П'єзоелектричні властивості таких кристалів з досить високою повторюваністю можна задавати шляхом композиції компонентів, що входять до його складу.

Вирощені кристали певним чином ріжуться на пластини, деякі (сегнетоелектрики) поляризуються, і з них, шляхом шліфування і нанесення електродів, виготовляються п'єзоелектричні елементи.

До природних п'єзоелектричних монокристалів відносяться кварц і його похідні: безбарвний кварц – гірський кришталь, фіолетовий – аметист, димчастий – раухтопаз, чорний – морион, золотистий – цитрин та ін.

2. П'єзоелектрична кераміка. П'єзокераміка належить до ферроелектричних матеріалів. Ферроелектричні матеріали – це матеріали, які поляризовані без додавання до них електричного поля. Це явище називається спонтанною поляризацією. Характерною рисою цього стану є термодинамічно стабільна оборотність осі поляризації при впливі електричного поля. Оборотність поляризації і зв'язок між електричними і механічними ефектами є найзначнішими в цьому матеріалі, який широко використовується в техніці. Найбільш популярний матеріал, який використовується на практиці це свинцево-цирконієвий титан (lead-zirconate-titanate,  $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ , (PZT)). Цей матеріал не є ферроелектриком при температурах вище деякої граничної температури, яка називається температурою Кюрі.

Ферроелектричні кристали діляться на області, так звані домени. Кожен домен має однакову поляризацію, а різні домени мають різні напрямки поляризації. У полікристалічній кераміці окремі кристали мають кілька доменів, розділених стінками. У разі великих змін електричного поля або механічної напруги, відбувається зміщення зарядів і полярність всього домену змінюється на протилежне в результаті реформування домену. Ці процеси і незворотність зміщення стінок домену є одними з причин виникнення гістерезису в п'єзокераміці. При виготовленні п'єзокераміки полікристали спікаються і під впливом високої температури спікання домени деполяризуються. У цьому стані існує майже рівномірний розподіл напрямків спонтанної поляризації доменів. Матеріал в цьому стані є ізотропним, тобто не п'єзоелектриком. При додаванні сильного електричного поля, спонтанна поляризація переорієнтується на насичену поляризацію. Цей процес, в



кінцевому підсумку, призводить до залишкової поляризації, паралельної прикладеному електричному полю і матеріал стає анізотропним, тобто п'єзоелектриком.

Поляризація, зазвичай, є остаточним процесом при виготовленні п'єзокерамічних елементів, хоча за нею слідує термостабілізація і контроль параметрів.

### 1.3.1. Основні параметри п'єзокераміки

Параметри п'єзокераміки залежать від напрямку докладання зусиль і електричної напруги. У спрощеній формі їх можна записати наступним чином [25]:

$$\begin{aligned} D &= d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E; \\ S &= s^E \cdot T + d \cdot E, \end{aligned} \quad (1.13)$$

де  $D$  – діелектричні зміщення,  $T$  – механічна напруга,  $E$  – напруженість електричного поля,  $S$  – механічна деформація,  $d$  – п'єзоелектрична постійна заряду,  $\varepsilon^T$  – сприйнятливість або відносна діелектрична постійна (при постійній температурі),  $\varepsilon^E$  – постійна пружності (при  $E = const$ ).

Значення п'єзоелектричних постійних залежать від напрямку і мають індекси, що вказують їх напрямки. Вектор поляризації зазвичай спрямований уздовж осі  $Z$  (3-ї осі) декартової системи координат. Параметри за напрямками задаються нижніми індексами 1, 2, 3, які відповідають напрямкам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис.1.19). Механічні зсувні напруження (пари) навколо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  задаються нижніми індексами 4, 5, 6, відповідно.

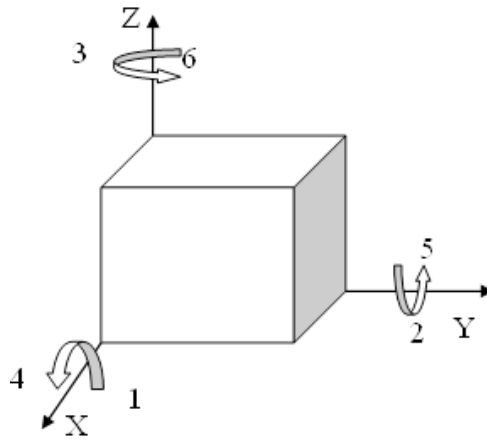


Рис.1.19. Декартова система координат, яка описує параметри п'єзоматеріалу

П'єзокераміка характеризується наступними основними параметрами:

- сприйнятливість або відносна діелектрична постійна,  $\epsilon$  – це міра поляризованості матеріалу. Спрямованість сприйнятливості виражається компонентами тензора, індекси якого вказують напрям електричного поля і напрям діелектричного зсуву. Наприклад,  $\epsilon_{33}^T$  описує значення поляризації в напрямку 3 і напрям діелектричного зсуву також 3, при постійній механічній напрузі  $T$ .  $\epsilon_{31}^T$  описує значення поляризації в напрямку 3, а напрям діелектричного зсуву 1 при постійній механічній напрузі  $T$ .

- п'єзоелектрична постійна напруги,  $g$  визначається як відношення напруженості електричного поля  $E$  до ефективної механічної напруги,  $T$ :  $g = -\frac{E}{T}$ , але так як  $V = El$ , де  $l$  – довжина пластини, а  $T = F/A$ , де  $A$  – поперечний переріз пластини,  $F$  – діюча сила, то можна користуватися і іншим співвідношенням:  $V = -\frac{g_{31}Fl}{A}$ . Коефіцієнт  $g_{31}$  описує електричне поле індуковане в напрямку 3, механічною напругою, прикладеною в напрямку 1. Саме цей коефіцієнт  $g_{31}$  визначає ефективність збудження і компенсації хвилі в резонаторі, шляхом подачі на п'єзокераміку відповідної напруги.

- п'єзоелектрична постійна заряду,  $d$  або постійна деформації – це міра індукованого заряду у відповідь на механічне напруження (або прикладання сили).  $d_{ii}$  – щільність заряду, що отримується при одиничній механічній напрузі. Коефіцієнт  $d_{31}$  визначає чутливість і точність вимірювань коливань резонатора.

– постійна пружності або податливості,  $s$  – це відносна механічна деформація  $S$  при дії одиничної механічної напруги  $T$ :  $s = S/T$ . Модуль Юнга п'єзокераміки  $Y = 1/s$ . Коефіцієнт  $s_{33}^E$  описує відношення механічної деформації в напрямку 3 до механічної напруги в тому ж напрямку при постійному електричному полі ( $E = \text{const}$ ).

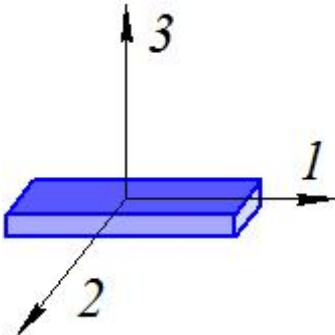






– коефіцієнт втрат або тангенс кута втрат,  $\text{tg}\delta$  – це відношення активного опору п'єзокераміки до його реактивного опору або величина, що зворотна добротності:  $\text{tg}\delta = 1/Q$ .

– коефіцієнт зв'язку,  $k$  – це міра ефективності п'єзоелектричного ефекту. Цей коефіцієнт описує здатність п'єзоелектричного матеріалу перетворювати електричну енергію в механічну і навпаки. Коефіцієнт зв'язку дорівнює кореню квадратному відносини збереженої енергії до сумарної енергії переданої матеріалу.  $k_{33}$  – коефіцієнт зв'язку для поздовжніх коливань,  $k_{31}$  – коефіцієнт зв'язку для поперечно-повздовжніх коливань.

Моди п'єзокераміки визначаються його геометрією, пружними властивостями і напрямком поляризації. Найбільш важливі моди п'єзопластини з відповідними постійними показані у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Моди коливань п'єзокерамічної пластини

Осі пластини	Пластина			Коефіцієнт
	Полярність	Електричне поле	Деформація	
	Поперечні коливання			
				$d_{33}, g_{33}, k_{33}$ $s_{33}, \epsilon_{33}$
	Повздовжні коливання			
				$d_{31}, g_{31}, k_{31}$ $s_{11}, \epsilon_{33}$

### 1.3.2. Визначення залежності ємності п'єзокераміки від температури

При моделюванні конструкції металевого резонатора було виявлено, що оптимальні розміри п'єзодатчиків становлять  $5 \times 2 \times 0,2$  мм.

Для проведення досліджень було обрано три марки п'єзокермічних пластин: APC851, PIC181 та NCE41, що за даними виробників мають оптимальні параметри для роботи в складі вібраційного гіроскопа. Основні параметри п'єзокерамічних пластин наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Параметри п'єзокерамічних пластин

Параметр		Марка		
		APC851	PIC181	NCE41
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon^0$		1950	1200	1350
$tg\delta, 10^{-4}$		150	30	40
$k_p, \%$		0,71	0,56	0,57
$k_{33}, \%$		0,51	0,66	0,68
$k_{31}, \%$		0,36	0,32	0,33
$-d_{31}$	$10^{-12} \frac{C}{N}$	175	120	130
$d_{33}$		400	265	310
$g_{33}$	$10^{-3} \frac{Vm}{N}$	24,8	25	25
$-g_{33}$		12,4	11,2	11
$s_{33}$	$10^{-12} \frac{m^2}{N}$	н.д.	14,2	16
$s_{11}$		н.д.	11,8	13
$T_c, ^\circ C$		360	330	290

Після приклеювання п'єзокерамічних пластин на металевий резонатор генератора коливань чутливого елемента вібраційного гіроскопа була проведена перевірка залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури в діапазоні  $[-40 \dots + 80] ^\circ C$  [26].

Однією із основних вимог при роботі вібраційного гіроскопа є ідентичність двох амплітуд коливань, тому при проведенні складальних робіт

проводиться відбір п'єзодатчиків за ємністю. Максимальна різниця показників ємності має становити не більше 3%.

До складу кожного генератора коливань чутливого елементу вібраційного гіроскопа входить 8 п'єзодатчиків, що розташовані під кутом  $45^\circ$  один до одного. Для кожного з типів датчиків було проведено вимірювання їх ємності в діапазоні температур від  $-40$  до  $+80^\circ\text{C}$  з дискретністю  $10^\circ\text{C}$ .

Ємності п'єзокерамічних пластин марки APC851 в діапазоні температур представлені в таблиці 1.7. Графік залежності ємності від температури представлений на рис.1.20.

Таблиця 1.7

Ємності п'єзокерамічних пластин марки APC851

Темпе-ратура, $^\circ\text{C}$	Ємність, пФ								Середнє значення ємностей, пФ
	1	2	3	4	5	6	7	8	
-40	444	440	457	457	442	444	457	460	450,1
-30	454	449	465	468	458	455	469	470	461,0
-20	464	462	474	476	462	458	472	474	467,8
-10	486	484	492	496	481	473	489	494	486,9
0	498	497	520	510	490	481	496	500	499,0
10	501	498	508	509	495	485	497	497	498,8
20	498	493	508	510	493	485	497	497	497,6
30	504	495	512	513	496	493	505	506	503,0
40	513	503	522	522	505	503	515	516	512,4
50	525	515	535	533	518	515	527	528	524,5
60	539	527	548	545	529	527	539	540	536,8
70	553	542	562	560	543	540	553	555	551,0
80	568	555	575	572	556	552	564	565	563,4
85	574	565	585	580	565	563	576	574	572,8

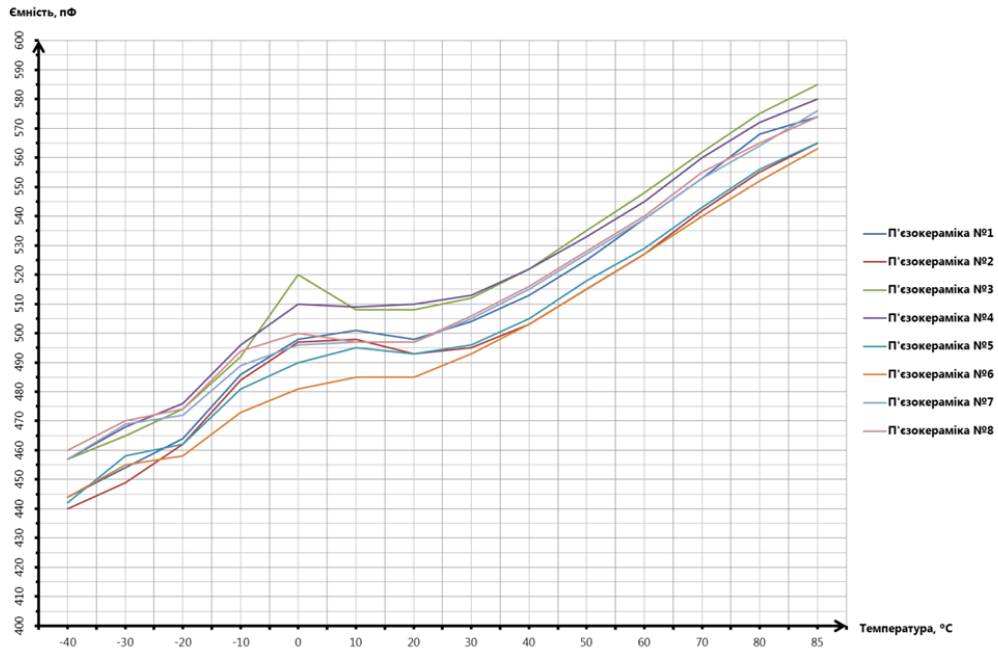


Рис.1.20. Графік залежності ємності п'єзокераміки марки APC851 від температури

Ємності п'єзокерамічних пластин марки PIC181 в діапазоні температур представлені в таблиці 1.8. Графік залежності ємності від температури представлений на рис.1.21.

Таблица 1.8

Ємності п'єзокерамічних пластин марки PIC181

Темпе- ратура, °C	Ємність, пФ								Середнє значення ємностей, пФ
	1	2	3	4	5	6	7	8	
-40	466	473	457	457	435	451	457	469	458,2
-30	469	469	459	452	439	462	461	471	460,3
-20	483	478	468	461	447	469	469	483	469,6
-10	491	490	479	473	459	479	478	491	480,0
0	505	502	491	485	471	493	490	503	492,4
10	512	510	500	495	483	505	502	513	502,4
20	527	522	513	505	493	512	512	517	512,6
30	539	534	529	517	507	525	520	527	524,7
40	554	547	542	532	519	542	534	541	538,9
50	568	559	554	546	534	556	547	553	552,1
60	583	573	570	558	547	568	558	563	564,8
70	593	588	585	578	563	587	575	575	580,3
80	612	602	600	588	580	602	590	592	595,6
85	629	624	619	610	595	614	600	604	611,8

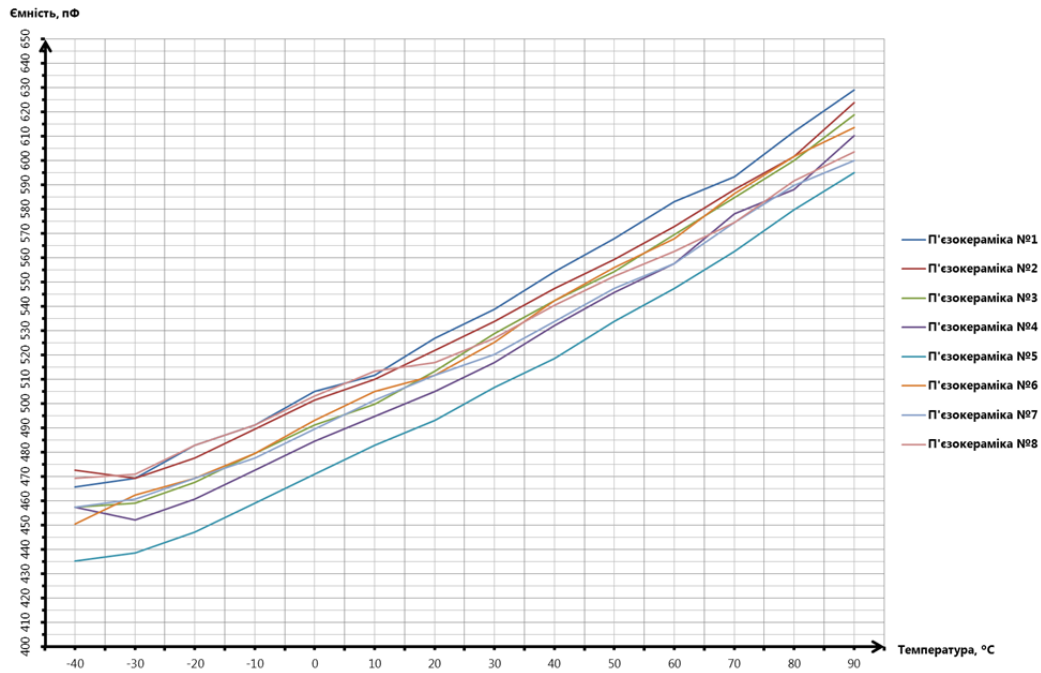


Рис.1.21. Графік залежності ємності п'єзокераміки марки PIC181 від температури

Ємності п'єзокерамічних пластин марки NCE41 в діапазоні температур представлені в таблиці 1.9. Графік залежності ємності від температури представлений на рис.1.22.

Таблиця 1.9

Ємності п'єзокерамічних пластин марки NCE41

Темпе- ратура, °C	Ємність, пФ								Середнє значення ємностей, пФ
	1	2	3	4	5	6	7	8	
-40	441	428	436	436	436	433	431	438	434,7
-30	422	411	426	423	423	422	420	429	422,0
-20	425	413	428	425	424	420	418	428	422,7
-10	432	420	440	432	430	428	425	435	430,2
0	443	442	433	432	447	449	435	432	439,1
10	453	436	455	452	448	443	450	454	448,7
20	451	438	453	448	446	440	445	448	446,2
30	462	449	461	455	456	449	449	455	454,7
40	475	462	474	467	469	461	462	467	467,1
50	491	476	488	481	481	474	475	480	480,6
60	503	490	503	495	495	487	488	492	494,2
70	517	501	514	507	505	498	500	503	505,4
80	544	526	539	531	528	522	527	527	530,5
85	563	546	556	551	549	540	542	546	549,2

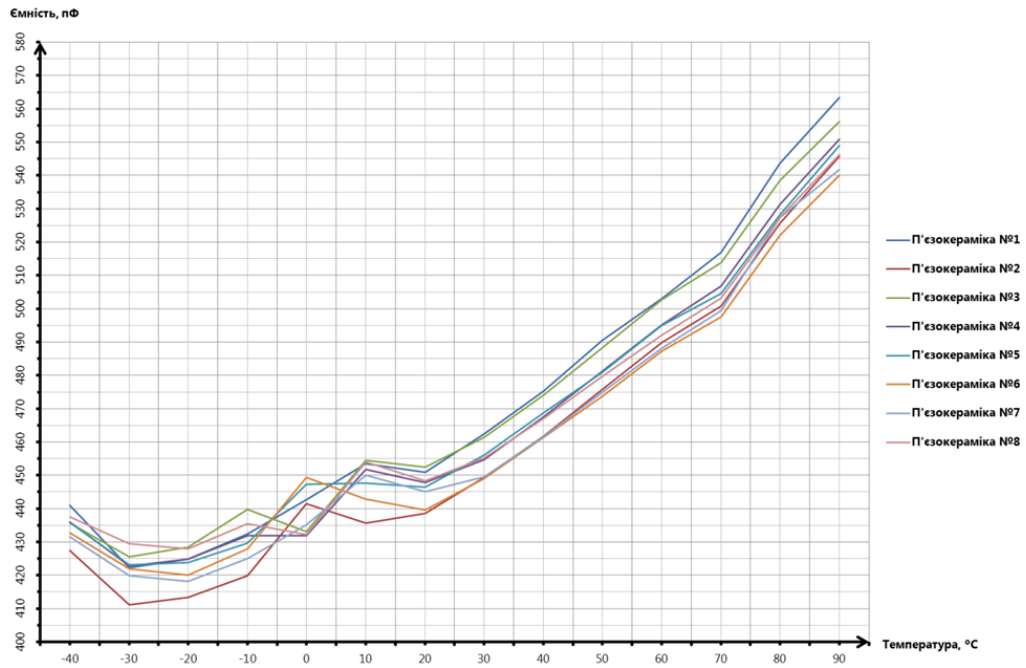


Рис.1.22. Графік залежності ємності п'єзокераміки марки NCE41 від температури

Усереднені значення всіх п'єзодатчиків на кожній температурі представлено в таблиці 1.10. Графік залежності усередненої ємності від температури представлений на рис.1.23.

Таблиця 1.10

Усереднені значення ємностей п'єзокераміки

Температура, °C	Марка		
	APC851	PIC181	NCE41
-40	450	438	435
-30	461	446	422
-20	468	456	423
-10	487	468	430
0	499	482	439
10	499	491	449
20	503	509	446
30	512	522	455
40	525	536	467
50	537	553	481
60	551	569	494
70	563	587	505
80	573	600	531



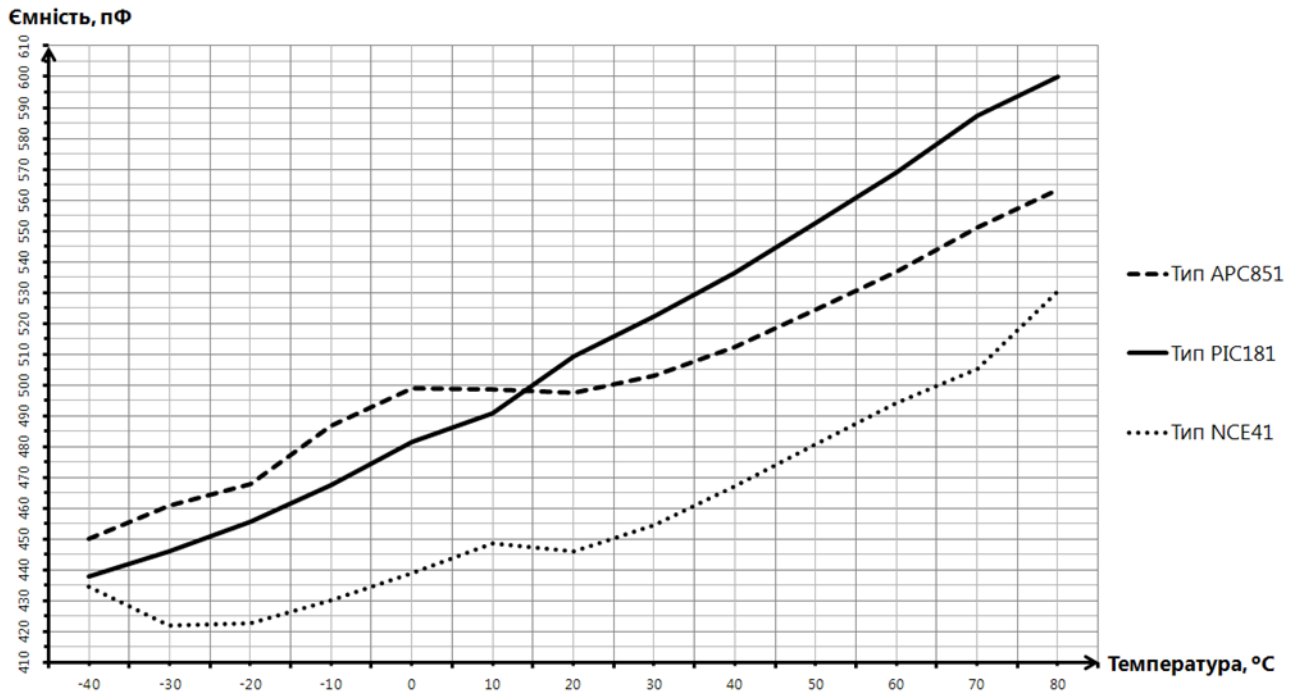


Рис.1.23. Графік залежності усередненої ємності п'єзодатчиків від температури

Як видно з графіків, при зміні температури, зміна параметрів ємності є лінійною тільки для марки PIC181 та значно нелінійною для п'єзодатчиків марки APC851 та NCE41. Таким чином, вибір марки PIC181 є очевидним.

Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків, приклеєних на резонатор вібраційного гіроскопа, від температури дозволив визначити таку марку п'єзоелектродів, що дозволяє поліпшити точність корегування температурної похибки приладу.

### 1.3.3. Співвідношення напруг на вході та виході чутливого елемента

Проведемо розрахунок співвідношення між напругами на виході вимірювальної п'єзокераміки (п'єзокерамічного датчика) в залежності від напруги, яка подається на вхід п'єзокерамічного виконавчого елемента на резонансній частоті. Фактично, це визначає коефіцієнт посилення чутливого елемента КВГ (резонатора з датчиками знімання і збудження коливань) по напрузі.

Припустимо, що клейовий шар має малу товщину в порівнянні з товщиною резонатора і п'єзокераміки, тому її впливом на передачу механічного впливу можна знехтувати. Реальні співвідношення товщини: п'єзокерамічні

пластини – 200 мкм, резонатор – 400 мкм, клей – 3 мкм. Крім того, так як модуль Юнга металевого резонатора значно перевищує модуль Юнга п'єзокераміки, то будемо вважати, що з'єднання п'єзокераміка–резонатор має модуль Юнга матеріалу резонатора.

Напруга  $V_{out}$  на виході вимірювальної п'єзокераміки прямокутної форми запишеться наступним чином [27]:

$$V_{out} = \frac{g_{31}}{l} F, \quad (1.14)$$

де  $g_{31}$  – п'єзоелектрична постійна напруги,  $l$  – довжина п'єзокераміки,  $F$  – сила, що діє на п'єзокераміку.

Сила  $F$  визначається співвідношенням:

$$F = \sigma l t_p, \quad (1.15)$$

де  $\sigma$  – механічне напруження,  $t_p$  – товщина п'єзокераміки.

Для малих деформацій виконується закон Гука – механічне напруження лінійно пов'язане з відносним подовженням  $\omega = \frac{\Delta l}{l}$  коефіцієнтом пропорційності рівним модулю Юнга з'єднання п'єзокераміка–резонатор,  $E_r$ .

$$\sigma = E_r \omega. \quad (1.16)$$

Відносне подовження  $\omega$  генерує в п'єзокераміці електричну напругу  $V_{in}$ , яке визначається за формулою:

$$\omega = \frac{d_{31}}{t_p} V_{in}, \quad (1.17)$$

де  $d_{31}$  – п'єзоелектрична постійна заряду.

Визначаючи силу  $F$  із співвідношень (1.15), (1.16) та (1.17), та підставляючи результати в (1.14), отримаємо:

$$V_{out} = g_{31} d_{31} E_r V_{in} \quad (1.18)$$

Підставляючи значення  $g_{31}$ ,  $d_{31}$  із таблиці 1.6 для РІС181 та модуль Юнга матеріалу резонатора  $E_r = 2 \times 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, отримаємо:

$$V_{out} \approx 0,13 V_{in}. \quad (1.19)$$

На рис.1.24 представлені графіки амплітуд напруг, які подаються на збудження і які знімаються з п'єзокерамічних датчиків для реального КВГ.

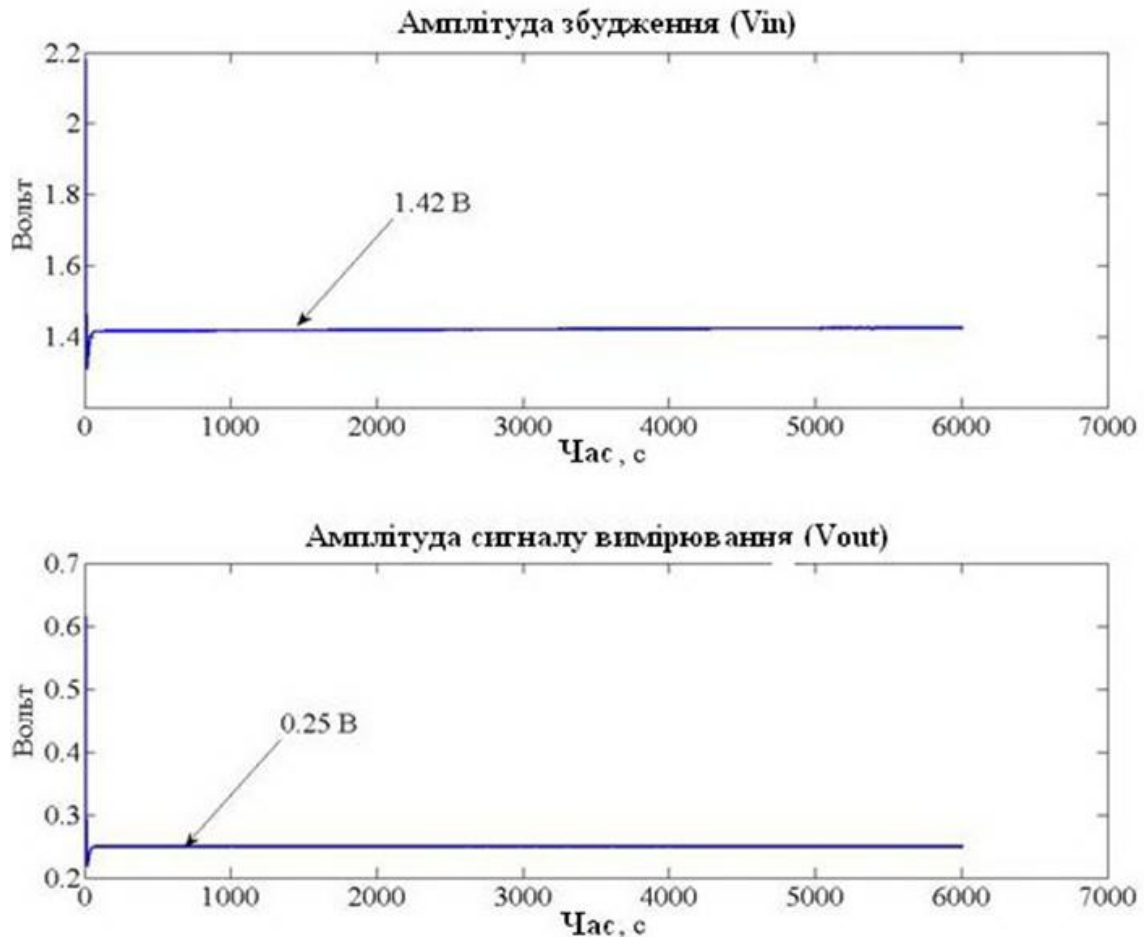


Рис.1.24. Відношення між вхідним ( $V_{in}$ ) та вихідним ( $V_{out}$ ) напругами в чутливому елементі реального КВГ

Як видно з графіків, відношення між  $V_{out}$  та  $V_{in}$  для реального КВГ становить 0,17, що досить близько до значення 0,13. Таким чином, спрощена методика оцінки відношення  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$  дає прийнятний результат і досить добре узгоджується з експериментальними даними, представленими на рис.1.24.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Проаналізовано конструкцію основних частин КВГ з металевим резонатором: чутливого елемента, генератора коливань, резонатора, електронних блоків та корпусних деталей. Визначено принципи побудови основних елементів для проведення моделювання.

Проведено вибір матеріалу для виготовлення резонаторів КВГ на основі

визначення температурних коефіцієнтів частоти елінварних сплавів. ТКЧ для резонатору зі сплаву С300 становить  $4,9 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , а зі сплаву 03Н18К9М5Т –  $12,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , що в 5-10 разів менше, ніж для плавленого кварцу. ТКЧ показує, що для виготовлення резонаторів доцільно використовувати мартенситно-старіючі сплави з особливими режимами термообробки.

Проведено аналіз конструкції резонатору КВГ з отворами на його дні у формі «круг» та «трикутник», проведено розрахунок моделі резонатора використовуючи вирази для резонансної частоти циліндричної оболонки, моментів інерції та співвідношень жорсткості. Проаналізовано власні частоти запропонованих конструкцій резонатора комп'ютерним моделюванням та обрано конструкції резонаторів з оптимальними характеристиками.

Проведено оптимізацію конструкції резонатора для зменшення чутливості до зовнішніх збурень, змістивши отвори на його твірну циліндричну поверхню. Визначено основні конструкційні розміри резонатора комп'ютерним моделюванням та форму отворів.

Проаналізовано конструкцію чутливого елемента, запропоновано використання склоспаю безпосередньо основи та скла без використання спеціальної втулки, метод проведення вакуумування його внутрішньої порожнини.

Виконано підбір виконавчих елементів та датчиків системи керування хвилею КВГ шляхом визначення залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури. Визначено, що п'єзокерамічні пластини марки РІС181 мають лінійну залежність.

Проведено розрахунок співвідношення між напругами на вході вимірювальної п'єзокераміки в залежності від напруги, яка подається на вхід п'єзокерамічного виконавчого елемента на резонансній частоті. Для реального КВГ це співвідношення становить 0,17.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Chikovani V.V. Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy /V.V. Chikovani, O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The sixth world congress «Aviation in the XXI-st century». — 23-25 Sept., NAU, Kyiv, 2014. — №2. — PP.3.5.34-3.5.38.
2. Чіковані В.В. Патент на винахід 95709 Україна, МПК G01C 19/02. Спосіб виміру кутової швидкості коріолісовим вібраційним гіроскопом / В.В. Чіковані; опубл.25.08.2011, Бюл. №16.
3. Бакалор Т.О. Экспериментальное исследование частотных характеристик кориолисова вибрационного гироскопа /Т.О. Бакалор, П.М. Бондарь // V науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». — 25-26 квітня, НТУУ «КПІ», Київ, 2006. — С.30.
4. Chikovani V. Features of design of Coriolis vibratory gyroscopes assigned for unmanned aerial vehicles /V. Chikovani, O. Sushchenko, O. Petrenko, S. Egorov // IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019). — 22-24 Oct., NAU, Kyiv, Ukraine, 2019. — PP.39-45
5. Безвесільна О.М. Конструкція коріолісового вібраційного гіроскопу /О.М.Безвесільна, В.Г. Цірук, І. Гунов // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки). — 19 травня, 2018. — С.92-93.
6. Кучма С.М. Дослідження впливу термомеханічної обробки на спеціальні термопружні властивості елінвара /С.М. Кучма, С.Ю. Стародубов // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — 2012. — №36. — С.293-298.
7. Jeanroy A. Low-cost miniature and accurate sensors for tactical applications /A. Jeanroy, P. Featonby, J-M. Caron // 10-th S. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. — 2003. — PP.286-293.
8. Lynch D.D. Coriolis vibratory gyros /D.D. Lynch // Proc. Gyro Technology Symposium. — 21-23 Sept., Stuttgart, Germany, 1998. — PP.3.1-3.14.

9. Lynch D.D. HRG Development at Delco, Litton, and Northrop Grumman /D.D. Lynch // Proceedings of Anniversary Workshop on Solid-State Gyroscopy . — 19-21 May, Kyiv, Ukraine, 2009.

10. Lynch D. D. Dual mode hemispherical resonator gyro operating characteristics /D.D. Lynch, A. Matthews // 3-rd S. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. — 1996. — №1. — PP.37-44.

11. Matthews A. Comparison of hemispherical resonator gyro and optical gyros /A. Matthews, F.J. Rybak // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. — 1992. — №7(5). — PP.40-46.

12. Rozelle D. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets /D. Rozelle // Proc. 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. — 2009. — PP.1157-1178.

13. Jeanroy A. HRG and marine applications /A. Jeanroy, A. Bouvet, G. Remillieux // Gyroscopy and navigation. — 2014. — №5(2). — PP.67-74.

14. Xie J. The application of chemical foaming method in the fabrication of micro glass hemisphere resonator /J. Xie, L. Chen, H. Xie, J. Zhou, G. Liu // Micromachines 2018. — 2018. — PP.9, 42.

15. Luo B. Hemispherical wineglass shells fabricated by a chemical foaming process /B. Luo, J. T. Shang, Y. Z. Zhang // Proc of the 16th International Conference on Electronic Packaging Technology. — 11-14 Aug., Changsha, China, 2015. — PP.951-954.

16. Патент 7637157 (USA Patent) МПК G10P 9/04. Stemless hemispherical resonator gyroscope / V.V. Chikovani, Y.A. Yatsenko, V.A. Kovalenko, V.I. Scherban. — №11/845,055; заявл.25.08.2007; опубл.14.05.2009.

17. Патент на винахід, 79166 Україна, МПК G01C 19/56. Циліндричний чутливий елемент вібраційного гіроскопа / Ю.О. Яценко, В.В. Чіковані, В.А. Коваленко; опубл.15.12.2006, Бюл. №7.

18. Патент на винахід, 97938 Україна, Резонатор коріолісового вібраційного гіроскопа / В.А. Бондарук, В.В. Возненко, С.П. Маляров, А.І. Пономаренко, В.Г. Цірук, Г.Є. Янкелевич; опубл.26.03.2012.

19. Патент 2445575 (RU patent) МПК G01C 19/56. Чувствительный элемент вибрационного кориолисова гироскопа / А.С. Барабашов, Ю.А. Яценко, И.Т. Миколишин; заявл.24.06.2008; опубл.20.03.2012.

20. Патент 7513156 (USA Patent) МПК G01P 9/04. Coriolis Force Gyroscope With High Sensitivity / V.V. Chikovani, Y.A. Yatsenko, V.A. Kovalenko. — №11/845,073; заявл.26.08.2007; опубл.24.06.2008.

21. Петренко О.В. Design analysis and parameters choice of metallic cylindrical resonator sensor for coriolis vibratory gyroscope /О.В. Петренко // Electronics and Control Systems . — NAU, Kyiv, 2014. — №2(40). — С.87-91.

22. Патент 97783 Україна, МПК G01C 19/56. Чутливий елемент коріолісова вібраційного гіроскопа / С.П. Малярів, В.Г. Цірук, А.В. Ніколаєнко; №а201110539; заявл.31.08.2011; опубл.12.12.2011, Бюл. №23.

23. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2019. — №14. — С.103-108.

24. Бобцов А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: Учебное пособие /А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев .— Санкт-Петербург. , 2011. — 134 С.

25. Jaffe В. Piezoelectric Ceramics /В. Jaffe, W. Jr. Cook, Н. Jaffe // Academic Press. — New York, USA, 1971.

26. Fundamentals of Piezo Technology. [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://piceramic.com/piezo-technology/fundamentals.html>.

27. Петренко О.В. Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків від температури в складі чутливого елемента вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, В.Г. Цірук // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». — 13-14 квітня, Київ, 2017. — С.56-59.

28. Fundamentals of Piezoelectricity. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://pdfs.semanticscholar.org /f063/529f370fa281407ba82e5803098940c0ba26.pdf](https://pdfs.semanticscholar.org/f063/529f370fa281407ba82e5803098940c0ba26.pdf).



## РОЗДІЛ 2

### БЕЗЕЛЕКТРОДНЕ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА

#### 2.1. Вимірювання основних характеристик резонатора акустичним методом

Після виготовлення резонаторів, необхідно перевірити точність їх виготовлення шляхом вимірювання динамічних і геометричних параметрів. Першочергово перевіряються геометричні параметри резонатора. Їх перевірка відбувається на спеціальному обладнанні [1].

Задля отримання високих параметрів точності та чутливості гіроскопічного датчика необхідно щоб резонатор був виконаний із максимальною точністю (з мінімальними відхиленнями від круглості та симетричності відносно осі деталі). Геометричні параметри резонатора задаються з точністю до 0,001 мм [2].

Таким чином, необхідний 100% контроль резонаторів на відповідність вимогам креслення.

Контроль таких параметрів дозволяє виконати кругломір.

Результати замірів наносяться на кругову діаграму (рис.2.1).



Рис.2.1. Діаграма результатів вимірювання геометричних параметрів резонатора

Основна особливість різниці у вимірюваннях полягає в наступному: якщо вважати, що профіль деталі є періодична крива синусоїдальної форми, причому на окружності укладається  $n$  періодів відхилень, то показання приладу будуть пов'язані зі значенням відхилення від круглості рівнянням:

$$X(p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(D)e^{-pD} dt = L\{x(D)\}, \quad (2.1)$$

де  $D$  – вимірювальний діаметр,  $p$  – відносна похибка.

Другим етапом перевірки виконання операцій термообробки є перевірка динамічних параметрів резонатора акустичним методом [3].

Основними параметрами при перевірці є:

- резонансні частоти;
- різночастотність;
- добротність;
- різнодобротність.

Для перевірки цих параметрів спроектовано спеціальне робоче місце (рис.2.2), що дозволяє здійснювати обробку акустичних даних за допомогою ЕОМ.

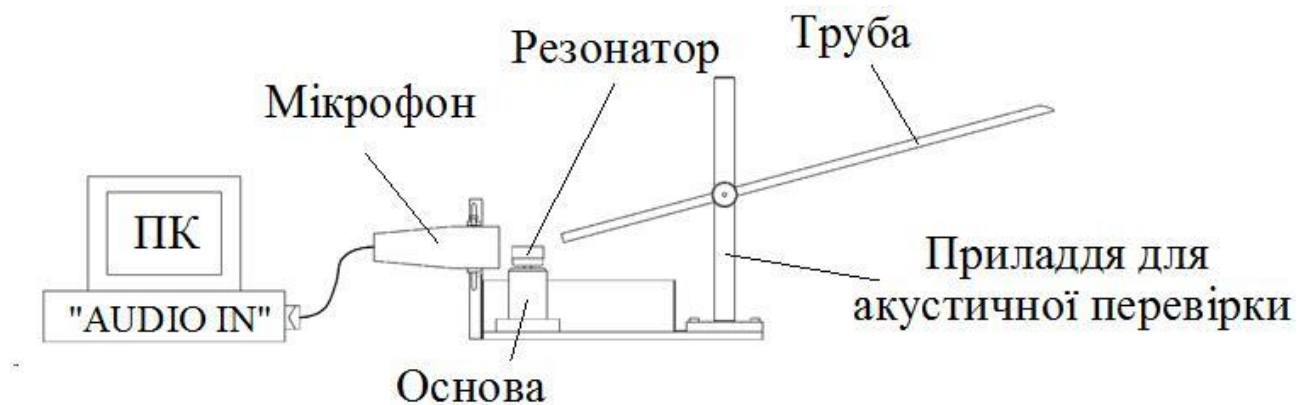


Рис.2.2. Схема робочого місця по перевірці акустичних параметрів металевих резонаторів

Метод полягає в аналізі звукових коливань в резонаторі після дії механічних збурень. Ці збурення виникають внаслідок контакту металевої кульки, що скочується по трубці приладдя з робочою поверхнею резонатора.

Звукові сигнали, що виникають в результаті зіткнення записуються мікрофоном та оброблюються у цифровому вигляді за допомогою ЕОМ.

Типова діаграма обробленого сигналу представлена на рис.2.3.

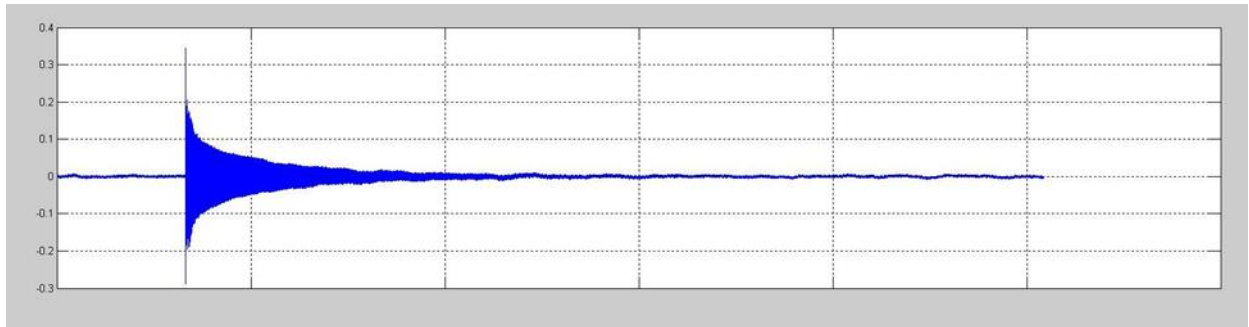


Рис.2.3. Діаграма обробленого звукового сигналу

Використовуючи швидке перетворення Фур'є для проведення спектрального аналізу, визначаємо робочі резонансні частоти резонатора (рис.2.4).

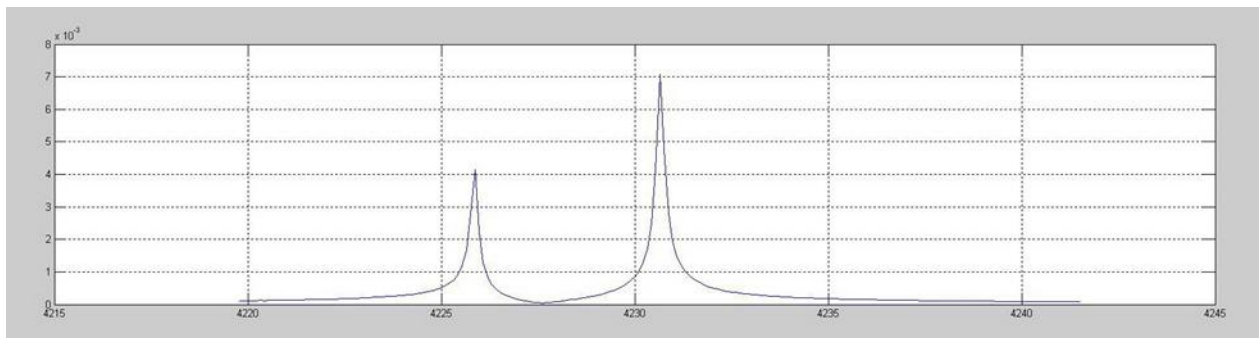


Рис.2.4. Резонансні частоти резонатора

Різничастотність визначається за формулою:

$$\Delta F = F_{p2} - F_{p1}, \quad (2.2)$$

де  $F_{p1}$  та  $F_{p2}$  – значення першого та другого резонансних піків.

Аналіз цих даних дозволяє оцінити можливості подальшого використання резонаторів, адже для отримання ізотропності амплітуди коливань резонатора його необхідно відбалансувати [4].

Вимогою до параметру різничастотності є:

$$\Delta F \leq 10 \text{ Гц}. \quad (2.3)$$

Добротність – параметр коливальної системи, що визначає ширину резонанса та характеризує, у скільки разів запаси енергії в системі більше, ніж втрати енергії за один період коливань.

Добротність зворотно-пропорційна швидкості затухання власних коливань в системі. Тобто, чим вище добротність коливальної системи, тим менші втрати енергії і тим повільніше затухають коливання.

В металевих резонаторах втрата енергії відбувається на стінках резонатора, його матеріалі та в елементах зв'язку.

Добротність резонаторів визначається за формулою:

$$Q = \frac{F_p}{F_2 - F_1}, \quad (2.4)$$

де  $F_p$  – резонансна частота,  $F_1$ ,  $F_2$  – частоти на рівні 0,707 амплітуди вихідного сигналу резонансної частоти (рис.2.5).

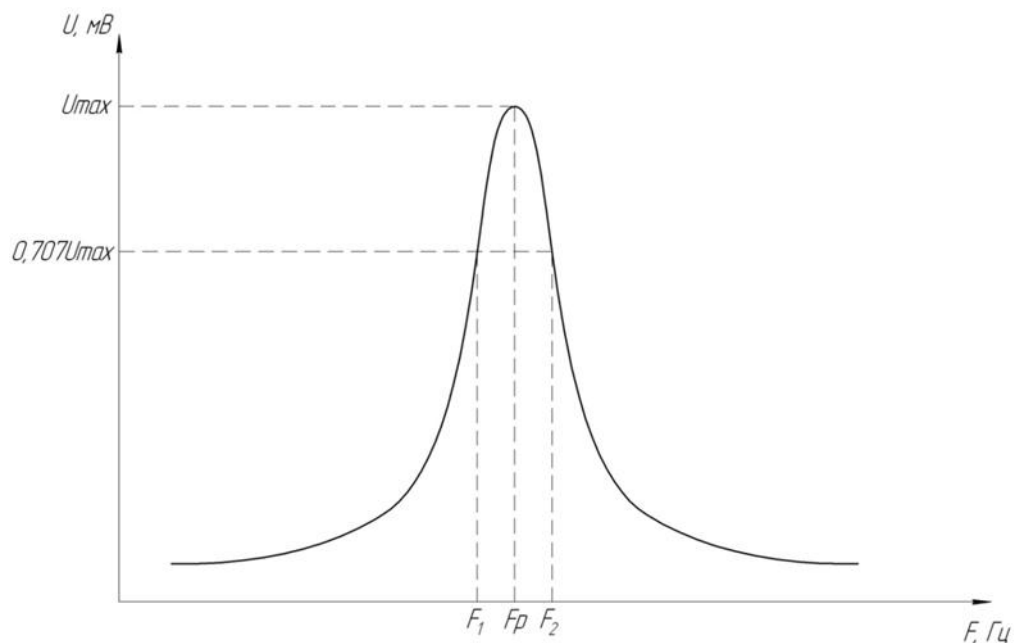


Рис.2.5. Типовий резонансний пік у металевому резонаторі

Визначення параметру добротності дозволяє оцінити правильність проведення операцій термообробки та неоднорідність розподілу маси по окружній координаті резонатора, а також можливість використання резонаторів на подальших етапах збірки.

Значення резонансних частот, різночастотності, добротності та різнодобротності до операції балансування мас заносяться до супровідної документації усіх резонаторів та використовуються при подальших операціях.

В таблиці 2.1 наведені параметри резонаторів, визначені за даною методикою.

Таблиця 2.1

Значення основних параметрів резонаторів до операції балансування мас

№	Резонансна частота 1, Гц	Резонансна частота 2, Гц	Різночастотність, Гц	Добротність 1	Добротність 2	Різнодобротність
1	2	3	4	5	6	7
1	5403,47	5410,30	6,83	15684,97	15322,30	362,67
2	5426,71	5429,19	2,48	15589,52	14817,67	771,85
3	5386,77	5390,46	3,69	8672,00	10533,46	1861,46
4	5400,95	5407,69	6,75	16475,49	17660,65	1185,16
5	5316,17	5320,00	3,83	16990,01	16325,51	664,50
6	5391,88	5393,21	1,33	16886,49	17247,22	360,73
7	5339,24	5344,43	5,19	9386,85	12339,92	3953,07
8	5391,94	5394,03	2,08	15257,34	15589,68	332,33
9	5378,21	5385,45	7,25	16401,98	15555,79	846,19
10	5359,87	5364,43	4,56	17946,78	19331,27	1384,50
11	5377,35	5385,71	8,36	15076,84	15476,19	399,35
12	5366,45	5370,38	3,93	18353,12	17383,10	970,02
13	5324,86	5326,75	1,88	15528,91	16862,13	1333,22
14	5333,70	5334,46	0,76	15658,79	16628,61	969,82
15	5312,06	5317,16	5,10	15161,73	15703,38	541,65
16	5342,88	5347,21	4,33	16289,25	15295,81	993,44
17	5369,28	5373,97	4,70	16480,28	15540,69	939,59
18	5370,63	5374,88	4,26	16678,96	17972,24	1293,28
19	5340,74	5340,92	0,19	16101,10	15572,77	528,33
20	5368,68	5371,85	3,17	17459,14	16897,93	561,21
21	5364,44	5372,32	7,87	16201,89	15649,05	552,84
22	5385,84	5387,31	1,47	15331,18	16772,46	1441,28
23	5337,09	5341,43	4,34	16438,50	17005,50	567,01
24	5380,66	5385,57	4,91	15122,70	16124,47	1001,76
25	5362,33	5364,35	2,02	14991,13	16143,10	1151,97
26	5373,26	5375,90	2,65	15869,04	15186,17	682,88
27	5364,57	5367,46	2,89	16557,31	15510,58	1046,73
28	5358,38	5361,16	2,78	17502,55	18247,65	745,10
29	5352,61	5361,64	9,04	15550,87	16178,77	627,90
30	5406,22	5411,62	5,40	15971,10	15343,40	627,70
31	5316,81	5322,24	5,43	16476,02	15584,70	891,32
32	5403,53	5408,64	5,11	15785,95	15387,30	398,65

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7
33	5364,34	5367,94	3,60	15898,05	16691,34	793,29
34	5361,58	5363,04	1,46	16796,59	17964,13	1167,54
35	5363,82	5365,57	1,76	17011,78	15752,74	1259,05
36	5352,82	5356,27	3,45	16885,87	17447,13	561,26
37	5328,50	5334,39	5,89	15642,76	15436,77	205,99
38	5366,16	5370,48	4,31	17479,67	18341,79	862,12
39	5383,97	5387,67	3,70	16664,74	17881,42	1216,67
40	5359,68	5361,67	1,99	11094,74	10342,69	752,05
41	5372,24	5374,07	1,83	15594,31	15019,75	574,55
42	5330,67	5330,67	0,01	15595,89	15706,15	110,26
43	5383,33	5385,44	2,11	14991,18	15705,57	714,39
44	5372,00	5375,26	3,26	17768,66	16845,05	923,61
45	5340,42	5343,38	2,96	15441,38	16578,37	1136,99

Як видно з таблиці результатів, резонатори №3, №7 та №40 не пройшли випробування акустичним методом в зв'язку зі заниженими параметрами добротності. Всі інші визнані такими, що відповідають вимогам конструкторської документації та передані на збірку генератора коливаль.

## **2.2. Оцінка впливу різночастотності, кута хвилі, похибок позиціонування п'єзокераміки на точність КВГ**

Як відомо, різночастотність визначає квадратурну складову сигналу в вузлі, а різнодобротність – Коріолісову складову цього сигналу. Таким чином, різночастотність впливатиме на зміщення нуля тільки через взаємозв'язок між квадратурною і коріолісовою компонентами, обумовлену, наприклад, різницею ємностей датчиків знімання і збудження, що зміщують фази сигналів на різні кути і іншими затримками при проходженні сигналів по різних електронних каналах, включаючи фазові похибки опорних сигналів, що виробляються для модуляції і демодуляції, а також температурними ефектами.

Різночастотність також впливає на масштабний коефіцієнт (МК) гіроскопа. Дійсно, Коріолісова сила має частоту збудження, а резонанс коріолісової моди відрізняється від частоти збудження на  $\Delta F$  – різночастотність. Відповідно, збуджуючи коріолісову моду не на резонансній

частоті, отримуємо її зменшену амплітуду, тобто менше значення  $MK$ , що призводить до додаткової похибки вимірювання кутової швидкості через менше відношення сигнал/шум.

### 2.2.1. Оцінка впливу різночастотності на зміщення нуля

Амплітуда сигналу у вузлі визначається, в основному, трьома параметрами: кутом хвилі щодо електрода збудження,  $\delta\varphi$ , зміщенням положення електрода щодо кутового положення  $45^\circ$ ,  $\Delta\varphi_e$ , і не ортогональних сигналів збудження і Коріоліса,  $a_E$ . Кут хвилі, в свою чергу, визначається різночастотністю і різнодобротністю.

Проведено оцінку впливу різночастотності на зміщення нуля.

Амплітуда квадратури  $A_q$  визначається вирішенням рівняння двовимірної маятника [5]:

$$A_q = \frac{A_{ex}\Delta F\tau^2 \sin(2\theta_\omega)}{4F}. \quad (2.5)$$

де  $A_{ex}$  – амплітуда збудження,  $\Delta F$  – різночастотність,  $\tau$  – постійна часу резонатора,  $\theta_\omega$  – кут між віссю мінімальної частоти і віссю коливань, тобто розташуванням стоячої хвилі,  $F$  – резонансна частота коливань.

Підставивши в (2.5) наступні відомі вирази:

$$A_{ex} = \frac{A_{ant}F^2}{Q}; \quad \tau = \frac{2Q}{F}, \quad (2.6)$$

де  $A_{ant}$  – амплітуда пучності,  $Q$  – добротність резонатора, та провівши перетворення, отримаємо:

$$A_q = A_{ant} \left( \frac{\Delta F}{F} \right) Q \sin(2\delta\varphi), \quad (2.7)$$

де  $\delta\varphi$  – кут між напрямком коливань стоячої хвилі і електродом збудження.

Внесок квадратури в зміщення нуля  $B_q$  визначається як:

$$B_q = A_q \sin a_q, \quad (2.8)$$

де  $a_q$  – похибка не ортогональності сигналів Коріоліса і квадратури.

Варіюючи обидві частини рівняння (2.8), отримаємо вираз для нестабільності зміщення нуля як функцію параметрів  $A_q$  та  $\alpha_q$  і їх нестабільності.

$$\Delta B_q = \Delta A_q \sin \alpha_q - A_q \Delta \alpha_q \cos \alpha_q = \Delta A_q \alpha_q - A_q \Delta \alpha_q \text{ для } \alpha_q \ll 1. \quad (2.9)$$

Перетворюючи рівняння (2.7) отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta A_q &= \Delta A_{ant} (\Delta F / F) Q \sin 2\delta\varphi + A_{ant} (\Delta F / F) \Delta Q \sin 2\delta\varphi = \\ &= (\Delta F / F) A_{ant} Q (\Delta A_{ant} / A_{ant} + \Delta Q / Q) \sin 2\delta\varphi. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Використовуючи співвідношення:

$$\Delta A_{ant} / A_{ant} = 2Q^2 (\Delta F / F)^2, \quad (2.11)$$

отримаємо для  $\Delta A_q$  :

$$\Delta A_q = (\Delta F / F) A_{ant} Q (2Q^2 (\Delta F / F)^2 + \Delta Q / Q) \sin 2\delta\varphi. \quad (2.12)$$

Підставивши (2.12) в (2.9) з урахуванням (2.6), для малих кутів  $\delta\varphi$  отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta B_q &= 4\delta\varphi A_{ant} \alpha_q Q^3 \left( \frac{\Delta F}{F} \right)^3 + \\ &+ \left[ 2\delta\varphi A_{ant} \alpha_q \left( \frac{\Delta Q}{Q} \right) Q - 2A_{ant} Q \delta\varphi \Delta \alpha_q \right] \left( \frac{\Delta F}{F} \right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Побудуємо залежність  $\Delta B_q$  від  $\Delta F$  при наступних параметрах резонатора:  $\delta\varphi = 2^\circ$ ,  $A_{ant} = 1\text{В}$ ,  $Q = 4 \times 10^4$ ,  $F = 5000\text{ Гц}$ ,  $\alpha_q = 0,5^\circ$ ,  $\Delta \alpha_q = 1,5^\circ$  (рис.2.6).

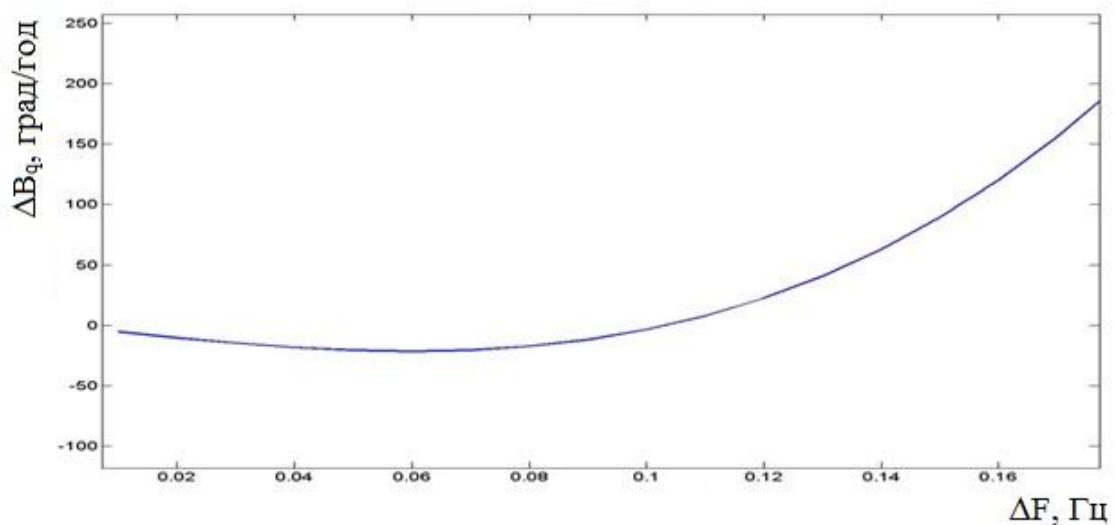


Рис.2.6. Графік залежності  $\Delta B_q$  від  $\Delta F$



Для того, щоб СКВ зміщення нуля було не більше 10 град/год, необхідно забезпечити  $-30 \text{ град/год} \leq \Delta B_q \leq 30 \text{ град/год}$ , що призводить до вимоги  $\Delta F \leq 0,12 \text{ Гц}$ .

### 2.2.2. Оцінка впливу різночастотності на МК КВГ

Очевидно, що  $\frac{\Delta A_{ant}}{A_{ant}} = \frac{\Delta SF}{SF}$ , де  $SF$  – масштабний коефіцієнт.

Тоді вимогу на різночастотність  $\Delta F$  можна отримати з виразу (2.7):

$$\Delta F = \frac{F}{Q} \sqrt{\frac{\Delta SF}{2SF}}, \quad (2.14)$$

Для  $\frac{\Delta SF}{SF} \leq 0,4\%$ ,  $F = 5400 \text{ Гц}$ ,  $Q = 2,5 \times 10^4$  отримаємо  $\Delta F \leq 0,01 \text{ Гц}$ .

### 2.2.3. Оцінка впливу різночастотності та різнодобротності на кут хвилі $\delta\varphi$

Кут  $\delta\varphi$  визначається виразом:

$$\tan 2\delta\varphi = \frac{A_{node}}{A_{ant}} = \frac{\sqrt{A_B^2 + A_q^2}}{A_{ant}}, \quad (2.15)$$

де  $A_B$  – амплітуда коріолісової компоненти в вузлі.

$$A_B = \frac{A_{ex}}{4F} \tau^2 \Delta \left( \frac{1}{\tau} \right); \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.7), підставляючи (2.6) в (2.16) та виконуючи перетворення, отримаємо:

$$\tan 2\delta\varphi = \sqrt{\left( \frac{\Delta F}{F} \right)^2 Q^2 + \left( \frac{\Delta Q}{Q} \right)^2}. \quad (2.17)$$

Із (2.14) випливає, що при  $\frac{\Delta F}{F} \gg \frac{\Delta Q}{Q}$ , кут  $\delta\varphi$  ( $\delta\varphi \ll 1$ ) визначається різночастотністю:

$$\delta\varphi \cong \frac{\Delta F}{2F} Q. \quad (2.18)$$

У процесі балансування  $\Delta F \rightarrow 0$  і виконується співвідношення  $\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{\Delta Q}{Q}$ , в цьому випадку кут хвилі визначається співвідношенням (2.17). Це означає, що різнодобротність починає впливати на  $\delta\varphi$  і при подальшому зменшенні різночастотності. Кут хвилі  $\delta\varphi$  може не змінюватися або навіть збільшуватися залежно від поведінки різнодобротності при балансуванні по 4-й гармоніці. Коли виконується співвідношення  $\frac{\Delta F}{F} \ll \frac{\Delta Q}{Q}$ , кут хвилі визначається різнодобротністю:

$$\delta\varphi \cong \frac{\Delta Q}{2Q}. \quad (2.19)$$

При стандартних значеннях  $\frac{\Delta Q}{Q} \approx 5\%$ , залежність  $\delta\varphi$  від  $\Delta F$  лінійна і для  $F = 5400\text{Гц}$  дає значення  $\delta\varphi \cong 1,95^\circ$  для  $\Delta F = 0,01\text{ Гц}$ . Ці значення є допусками для оцінки операції балансування.

#### 2.2.4. Оцінка похибки приклеювання електрода вузла щодо електрода пучності

Розглянемо компоненту зміщення нуля, обумовлену похибкою приклеювання електродів. Будемо вважати, що додатковий сигнал в вузлі, обумовлений похибкою приклеювання, дає внесок в зміщення нуля (не в квадратуру), так як фаза цього сигналу буде в фазі або в протифазі з сигналом пучності, в залежності від того справа або зліва від реального вузла приклеєний електрод. У цьому випадку будемо мати рівняння зміщення нуля:

$$B = A_{ant} \sin 2\Delta\varphi_e, \quad (2.20)$$

де  $\Delta\varphi_e$  – похибка приклеювання п'єзокераміки вузла щодо п'єзокераміки пучності (відмінність від  $45^\circ$ ).

Перетворюючи обидві частини (2.20) будемо мати:

$$\Delta B = \Delta A_{ant} \sin 2\Delta\varphi_e. \quad (2.21)$$

Для малих кутів  $\Delta\varphi_e$  і з урахуванням виразу (2.10) для  $\Delta A_{ant}$  отримаємо:

$$\Delta\varphi_e = \frac{\Delta B}{4Q^2 \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 A_{ant}}. \quad (2.22)$$

Із (2.22) випливає вимога до  $\Delta\varphi_e$  ( $\Delta B = 30$ град/год,  $A_{ant}=1B, \frac{\Delta F}{F} = 1,85 \times 10^{-6}$  ( $\Delta F = 0,01$  Гц,  $F = 5400$  Гц,  $Q = 25000$ ):

$$\Delta\varphi_e \leq \frac{3,3 \times 10^{-4}}{4 * 6,25 * 108 * 3,43 * 10^{-12} * 1} = \frac{3,3}{343} = 0,009 \text{ рад} = 0,52 \text{ град}. \quad (2.23)$$

Допустиме зміщення п'єзоелементів на радіусі  $R=10$  мм становитиме:

$$\Delta \leq R \cdot \Delta\varphi_e = 90 \text{ мкм}. \quad (2.24)$$

Задля дотримання вимоги (2.24) необхідно розробити спеціальне приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора.

### 2.3. Розробка приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора

Враховуючи конструктивні особливості резонатора, фізичні властивості п'єзокерамічних пластин та дотримання технологічних процесів приклеювання було промодельовано конструкцію спеціального приладдя.

Конструкція приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатору з отворами на дні представлена нарис.2.7.

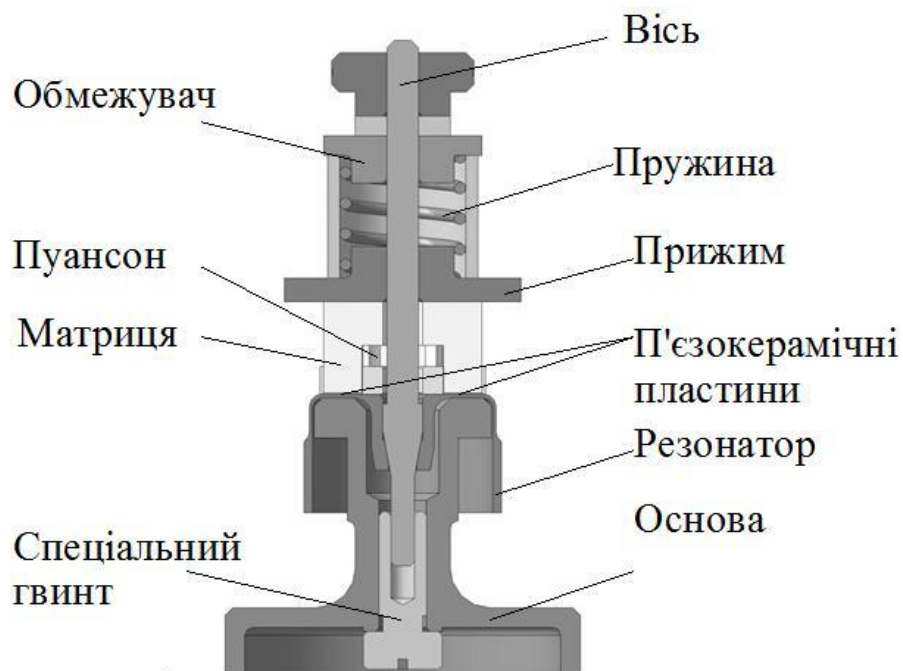


Рис.2.7. Приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора з отворами на дні

Центрування резонатора відбувається за допомогою конусної частини вісі, яка повністю повторює зворотну конусну частину резонатора. Спеціальний гвинт центрує всю конструкцію відносно основи та не дозволяє здійснювати повздовжнє переміщення резонатора під час операції приклеювання.

Матриця та пуансон розроблялися з урахуванням необхідності одночасного приклеювання усіх 8 п'єзокерамічних пластин, та виготовлені із фторопласту для унеможливлення приклеювання п'єзокерамічних пластин до приладдя.

Клей попередньо наноситься на спиці резонатора та на сторону п'єзокерамічної пластини. Вклавши усі пластини до матриці приладдя, за допомогою пуансона та прижима відбувається притиснення пластин до резонатора для витіснення надлишків клею, видалення бульбашок повітря та рівномірного розподілення клею по поверхні. Сила притиснення регулюється стисненням пружини. Висота обмежувача розрахована на оптимальну силу притиснення пластин до резонатора.

Приладдя з резонатором та п'єзокерамічними пластинами переміщуються до сушильної шафи для витримки режимів сушки клею.

Найбільш міцним є клейове з'єднання при мінімальній товщині клейової плівки  $\approx 2 \dots 3$  мкм.

Якість клейового з'єднання перевіряється візуально та заміром ємності кожної п'єзокерамічної пластини. Не допускаються напливи, тріщини, відслоювання металізованого шару п'єзокераміки. Ємності не мають значно відрізнятися від номінальних, що були визначені перед операцією приклеювання.

Якщо ємність деяких пластин відрізняється від номінальної більше ніж на 10%, то це вважається браком склеювання. Ці пластини знімаються механічним шляхом та відбувається заміна бракованих п'єзокерамічних пластин на нові.

Конструкція приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин на резонатор з отворами на його твірній циліндричній поверхні значно

відрізняється від представленої на рис.2.7, оскільки присутня не одна площина для приклеювання, а вісім, розташованих під кутом  $45^\circ$  одна до одної.

Конструкція приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин на резонатор з отворами на його твірній циліндричній поверхні представлена на рис.2.8.

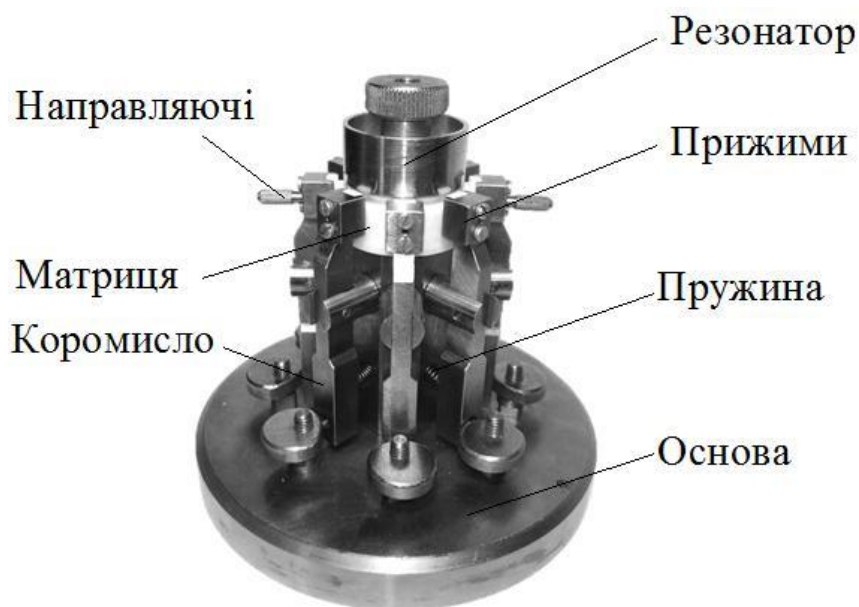


Рис.2.8. Приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин на резонатор з отворами на його твірній циліндричній поверхні

Резонатор встановлюється на конусну частину вісі основи приладдя. Матриця одночасно слугує направляючою для п'єзокерамічних пластин, центрує резонатор в приладді та не дозволяє здійснювати повздовжнє переміщення резонатора під час операції приклеювання. Спеціальні направляючі одночасно фіксують положення матриці та резонатора для недопущення їх провороту під час приклеювання.

Клей попередньо наноситься на спиці резонатора та на сторону п'єзокерамічної пластини. Вклавши пластину до матриці приладдя, відпустивши ексцентричну спеціальну гайку пружина здійснює переміщення коромисла та відбувається притиснення прижимом п'єзокерамічної пластини до резонатора. Інші операції аналогічні для приладдя, що представлено вище.

Якість клейового з'єднання перевіряється візуально та заміром ємності кожної п'єзокерамічної пластини.

## 2.4. Балансування резонатора у складі генератора коливань

### 2.4.1. Методи балансування металевих резонаторів

Невисока добротність металів пов'язана з наявністю в них дислокації, які представляють собою складні лінійні дефекти кристалічної структури. Лінії дислокації можуть бути прямими, кривими, а також у вигляді замкнутих петель. Дислокації можуть переміщатися по кристалічній решітці, при цьому розрізняють три основні види їх руху: коливання, ковзання і переповзання. Рухи дислокацій призводять до інтенсивного розсіювання енергії коливань і в кінцевому рахунку обмежують добротність металів.

В тонкостінних металевих резонаторах основний дисипативний процес пов'язаний з виникненням теплових потоків при деформації матеріалу.

При деформації твердого тіла, температура в різних його областях буде залежати від деформації середовища в цих областях, в результаті чого між ними будуть виникати теплові потоки, інтенсивність яких обумовлена теплопровідністю середовища [6]. Ці потоки будуть вирівнювати локальні температури тіла, приводячи до необоротного перетворення механічної енергії в теплову. Визначення величини цих втрат енергії коливань, які називаються термопружними втратами, може бути виконано за формулою:

$$\zeta = I \cdot \left[ \frac{F\bar{\tau}}{1 + (F\bar{\tau})^2} \right], \quad (2.25)$$

де  $I$  та  $\tau$  – інтенсивність та час теплової релаксації:

$$I = ET \frac{a}{C_p}; \quad \bar{\tau} \approx \frac{x^2}{\xi}. \quad (2.26)$$

$x$  – відстань, яку має пройти тепловий потік.

Відзначимо, що в кварцевому склі термопружні втрати також є, але вони малі зважаючи на малу величину коефіцієнта температуропровідності кварцевого скла, однак, для тонкостінних металевих резонаторів інтенсивність цього виду внутрішнього тертя виявляється дуже високою, досягаючи максимуму при  $F\bar{\tau} = 1$ , в результаті чого добротність металевих

напівсферичних і циліндричних резонаторів виявляється низькою. Щоб зменшити інтенсивність термопружних втрат, можна збільшити товщину частини резонатора, що коливається. Це збільшить час теплової релаксації і зрушить максимум термопружних втрат в область низьких частот.

Дійсно, для низькодобротних металевих резонаторів вимоги до розщеплення власної частоти істотно нижче, ніж для точних КВГ з кварцевими резонаторами. Разом з тим, додаткове зменшення розщеплення власної частоти дозволяє збільшити точність гіроскопа. Як і для кварцевих резонаторів, балансування металевих резонаторів може проводитися видаленням невідновленої маси з балансувальних зубців, проте з точки зору ціни резонатора балансування краще виконувати видаленням матеріалу безпосередньо з його циліндричної поверхні [7–9]. Добротність при цьому змінюється мало, але треба враховувати, що таке видалення матеріалу може призвести не тільки до зміни відповідної гармоніки масового дефекту, але і до істотної зміни жорсткості тонкостінної оболонки.

Нехай маємо циліндричний резонатор діаметром  $D$ , висотою  $H$ , з товщиною стінки  $h$ . Нехай в стінці резонатора, з метою видалення невідновленої маси і зміни розщеплення власної частоти, зроблений пропил шириною  $y$  і висотою  $L$  в напрямку однієї з його власних осей (рис.2.9). Такий надрізаний резонатор можна розглядати як збірний, що включає циліндр висотою  $(H - L)$  і розрізане кільце висотою  $L$ . Розрізане кільце має набагато меншу жорсткість і, крім того, володіє анізотропією жорсткості.

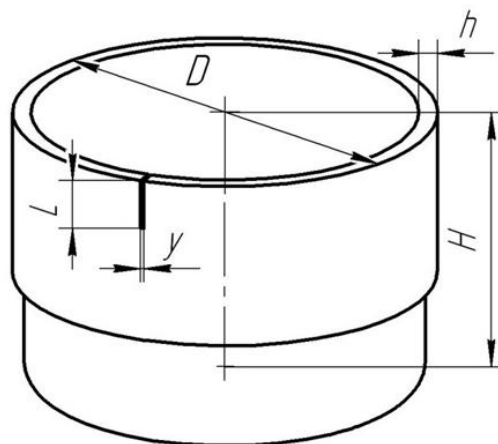


Рис.2.9. Надріз кромки циліндричного резонатора

Отже, можна очікувати, що в результаті надрізу частота коливань знизиться і відбудеться розщеплення власної частоти. Цей висновок підтверджується результатами комп'ютерного моделювання та експериментами [10]. На рис.2.10 показано зміна власних частот резонатора в залежності від глибини надрізу  $L$ , розраховане методом кінцевих елементів. Прийнята в розрахунку ширина надрізу становить  $y = 0,7$  мм.

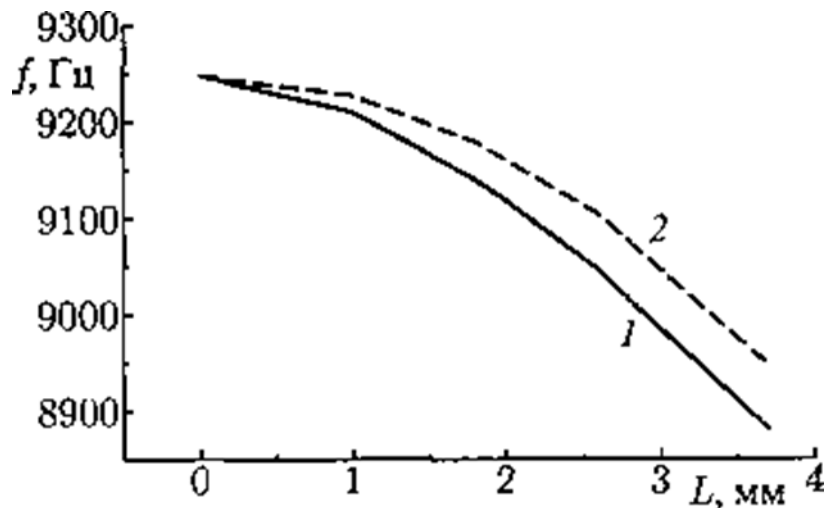


Рис.2.10. Зміна власних частот резонатора з ростом глибини надрізу (розрахунок)

Моделювання показує, що частота коливань при збільшенні глибини надрізу знижується, а розщеплення власної частоти швидко змінюється. Частота коливань уздовж своєї осі, що збігається з надрізом, знижується швидше, тому при балансуванні резонатора слід робити такий надріз в напрямку високочастотної осі. Основний внесок у зміну розщеплення власної частоти в цьому способі балансування вносить не зміна маси, а введена надрізом анізотропія твердості оболонки.

На рис.2.11 наведено експериментальні дані, що підтверджують правильність модельних розрахунків.



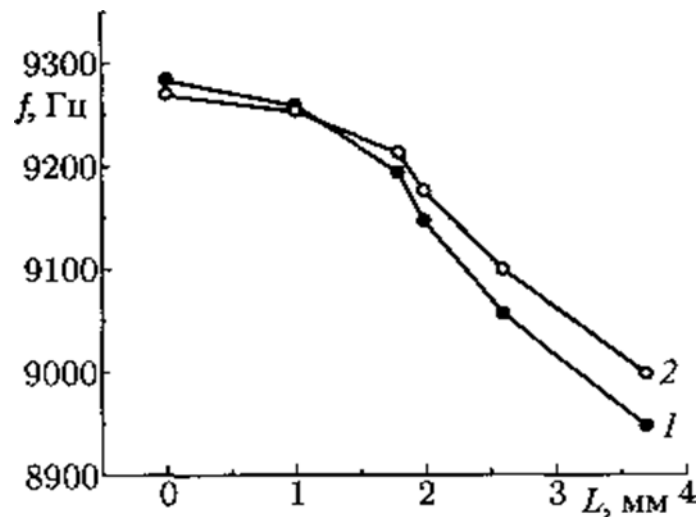


Рис.2.11. Зміна власних частот резонатора з ростом глибини надрізу  
(експеримент)

У процесі механічного балансування однією з найбільш складних проблем є визначення координат ділянки і кількості маси, що видаляється на даній ділянці. Кількість таких ділянок може бути досить велике, оскільки, наприклад, видалення маси тільки в одній точці на кромці резонатора з метою усунення першої гармоніки дефекту призводить до появи другої, третьої і четвертої гармонік. Для виключення цих кратних гармонік необхідно здійснювати балансування в декількох точках.

У процесі корекції перших чотирьох гармонік видаляються маси, які повинні розташовуватися симетрично, як показано на рис.2.12.

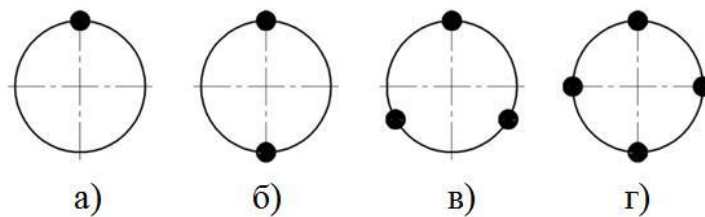


Рис.2.12. Відповідність розподілу маси по окружному куту гармонікам неоднорідності: а – 1-а гармоніка; б – 2-а гармоніка; в – 3-тя гармоніка; г – 4-а гармоніка

Як видно з рис.2.12, при наявності всіх перших чотирьох гармонік дефекту щільності, з урахуванням їх різної орієнтації і величини, всього необхідно видалити з кромки не менше десяти зосереджених мас.

Розглянемо особливості балансування, що виконується видаленням точкових мас [11–15]. Скористаємося  $\delta$ -функцією Дірака для опису розподілення маси оболонки резонатора при видаленні матеріалу в точці. Відомо, що розкладання в ряд Фур'є  $\delta$ -функції містить всі цілі гармоніки з однаковою амплітудою. Тобто при видаленні з оболонки маси  $\Delta m$ , розташованої в точці  $\varphi = 0$ , отримаємо наступне розподілення маси (на одиницю кута) уздовж азимутального кута  $\varphi$  [16]:

$$M(\varphi) = M(0) - 2\Delta m \sum_{k=1}^{\infty} \cos k\varphi. \quad (2.27)$$

Нехай, наприклад, необхідно усунути 1-у гармоніку масового дефекту величиною  $M_1$ . Її орієнтацію щодо резонатора для простоти приймемо рівною нулю,  $\varphi_1 = 0$ . Видалення з точки  $\varphi_1 = 0$  кромки резонатора маси  $\Delta m = \frac{M_1}{2}$  усуває цю гармоніку дефекту, але одночасно створює такі ж по величині 2-у, 3-ю і 4-у гармоніки. Їх подальше балансування також буде супроводжуватися появою кратних гармонік масового дефекту. Так, балансування 2-ї гармоніки масового дефекту видаленням однакових мас в 2-х точках буде супроводжуватися появою 4-ї гармоніки (з тією ж амплітудою), балансування 3-ї – появою 6-ї і т.д. Тобто усунення навіть однієї гармоніки масового дефекту оболонки вимагає видалення строго певної кількості матеріалу в декількох точках, так як необхідно послідовно усувати виникаючі в процесі балансування кратні гармоніки масового дефекту.

Варто також відзначити, що вираз (2.27) справедливий саме для точкового в математичному сенсі видалення маси. Насправді, область, в якій проводиться видалення матеріалу, має кінцеві розміри. Тоді, при видаленні маси  $\Delta m$  в околиці точки  $\varphi = 0$ , яку видно з центра обода під кутом  $\Delta\varphi$ , гармоніки ряду Фур'є матимуть різні амплітуди [17]:

$$M(\varphi) = M_0 - 2\Delta m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\Delta\varphi}{k\Delta\varphi} \cos k\varphi. \quad (2.28)$$

Для резонаторів малого діаметра цей ефект помітний і повинен бути врахований при визначенні величин видалення мас.

Ще один аспект балансування пов'язаний з тим, що в реальному резонаторі невідносна маса не зосереджена на кромці, як це передбачалося вище, а розподілена по всій оболонці. Наприклад, типовою причиною виникнення 1-ї гармоніки масового дефекту є розбіжність центрів зовнішньої і внутрішньої поверхонь [18]. На рис.2.13 показано розподіл невідносної маси по азимутальному кутку і по перерізу резонатора.

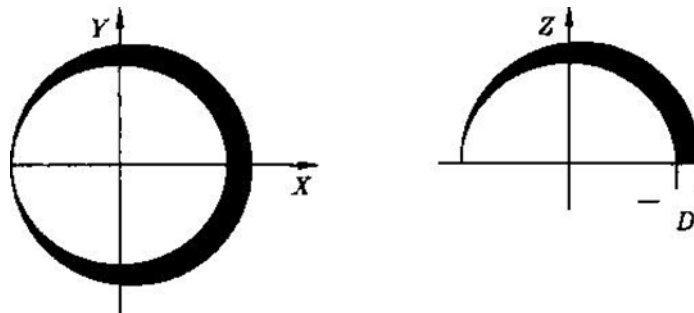


Рис.2.13. Розподіл невідносної маси по азимутальному куту і перерізу резонатора при розбіжності центрів зовнішньої і внутрішньої кромки

Розподілена по поверхні невідносна маса не може бути скомпенсована видаленням мас в точках, розташованих тільки на кромці оболонки. Для повного балансування необхідно видаляти такі маси, по меншій мірі, з двох паралелей, а це тягне за собою ускладнення процедури балансування [19, 20]. Таким чином, балансування по всім чотирьом гармонікам дебалансу мас, яка призводить до зменшення як різнодобротності, так і різночастотності є дуже тривалою процедурою, яка може не призвести до бажаного результату для деяких резонаторів. Тому, для недорогих КВГ невисокої точності, особливо для резонаторів малого діаметру балансування проводять тільки по 4-ій гармоніці дефекту, змешуючи тільки різночастотність.

### 2.4.2. Вплив похибок виготовлення резонатора на основні характеристики КВГ

Основна причина похибок КВГ є технологічні похибки виробництва резонаторів і неоднорідність матеріалу. Найбільш істотний вплив на похибку КВГ має неоднорідність розподілу маси вздовж просторових координат резонатора. Наприклад, для резонаторів, що представляють тонкі просторові оболонки (тобто є тілами обертання), це є неоднорідністю розподілу маси по окружній координаті резонатора, що виникають в результаті різниці товщини оболонки. Як показує аналіз Фур'є, різниця в товщині напівсферичної оболонки (циліндричної оболонки або кільця) вздовж окружної координати, для другої робочої моди ( $n = 2$ ) коливань, коли є чотири вузли та пучності вздовж периметра резонатора, максимальний вплив на похибку КВГ має четверта гармоніка масового дебалансу. У результаті наявності таких дефектів, власна частота коливань резонатора розщеплюється на дві частоти. Четверта гармоніка розподілу маси вздовж ободу резонатора дає наступні значення розщеплення частот:  $\Delta F = \frac{\varepsilon F_2}{2}$ , де  $\varepsilon$  – відносна величина дефекту ( $\frac{\Delta m}{m}$ ) на четвертій гармоніці.

Рис.2.14 показує простий розподіл товщини оболонки з великою компонентою на 4-й гармоніці, при якій товщина оболонки на чотирьох однаково розташованих точках більша, ніж в інших точках.

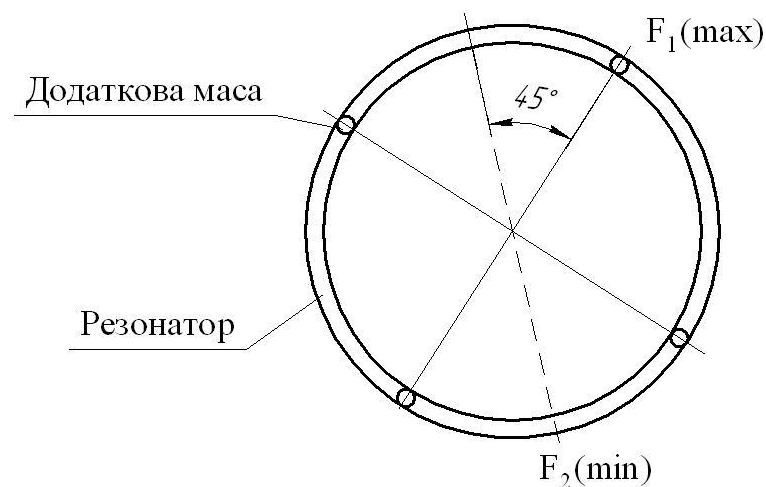


Рис.2.14. Четверта гармоніка розподілу маси

Оболонка, як правило, згладжує локальні жорсткості (або пружності), через варіації товщини. Основний внесок дається четвертою гармонікою варіації маси. Тому, якщо стояча хвиля розташована вузлами вздовж суцільної осі, а резонатор розглядається як лінійна коливальна система другого порядку, що має приблизно однаковий коефіцієнт жорсткості, але трохи більше ваги, то резонансна частота коливань хвилі, пучності якої встановлюється вздовж пунктирної осі, трохи нижче, ніж частота другої моди  $n = 2$ , коли пучність встановлюється вздовж суцільної осі. Наявність двох різних частот нормальних мод призводить до того, що стояча хвиля розташовується пучністю десь між нормальними осями, що вказані на рис.2.14, між якими кут є  $45^\circ$  для  $n = 2$ .

Для визначення результуючого руху хвилі, при довільному розташуванні пучності стоячої хвилі, необхідно розкласти коливання хвилі на компоненти вздовж нормальних осей. Оскільки ці компоненти коливаються з різними частотами, то складена стояча хвиля перестає бути стоячою хвилею, бо розвивається компонента бігучої хвилі. Це також можна пояснити тим, що створюється квадратурна компонента вторинної хвилі, пучності якої збігаються з вузлами первинної хвилі, що коливається з квадратурною фазовою по відношенню до первинної хвилі, тобто під фазовим кутом  $90^\circ$ . У цьому випадку з'являється так званий дрейф стоячої хвилі, швидкість якого визначається наступним виразом:

$$\dot{\theta} = \frac{1}{8} (\Delta F)^2 t \sin 4\varphi_0, \quad (2.29)$$

де  $\varphi_0$  – кут між напрямком коливань і однією з власних осей резонатора (наприклад, осі з мінімальною частотою коливань),  $\Delta F = F_1 - F_2$  – розщеплення власної частоти резонатора.

З виразу (2.29) можна бачити, що при  $\varphi_0 = 0, \frac{\pi}{4}$ , тобто коли напрямок коливань збігається з однією із власних осей резонатора, відсутній дрейф хвилі, а коливання представлені чистою стоячою хвилею (без бігучої компоненти). Слід зазначити, що для другої гармоніки резонатора дефект щільності матеріалу визначається виразом:

$$\rho = \rho_0(1 + \varepsilon_2 \cos 2\varphi). \quad (2.30)$$

Оцінка значення різночастотності резонатора визначається виразом:

$$\Delta F = \frac{8}{5} \varepsilon_2^2 F_2. \quad (2.31)$$

Як ми бачимо з цього виразу величини частоти розщеплення є другого порядку малості щодо другої гармоніки дефекту. Виключимо, що частота розщеплення через першу і третю гармоніки дефекту також дають величину другого порядку малості. Таким чином, при виготовленні резонатора необхідно звернути особливу увагу на четверту гармоніку дефекту, тому що ця гармоніка набагато сильніше впливає на похибки КВГ, ніж інші.

Іншим важливим джерелом дрейфу КВГ є нерівномірний розподіл джерел демпфування коливань в резонаторі (через неоднорідність його матеріалу). Як і у випадку варіації товщини оболонки, що призводить до розщеплення частоти, четверта гармоніка розподілу джерел демпфування по окружній координаті створює дефект.

Рис.2.15 показує спрощений розподіл джерел демпфування з більшою четвертою гармонікою.

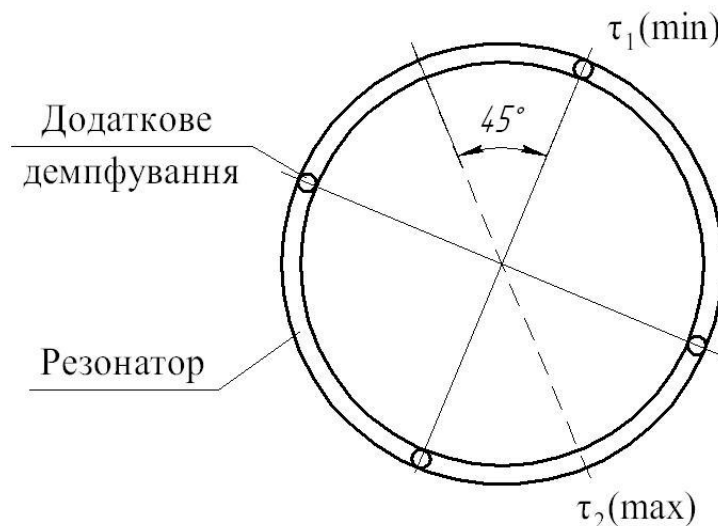


Рис.2.15. Четверта гармоніка розподілу демпфування

Демпфуючий матеріал володіє такою властивістю, що він гальмує коливання резонатора пропорційно радіальній швидкості оболонки в напрямку, де є джерело демпфування, тоді стояча хвиля з її пучністю, розташована в місцях джерела демпфування, буде мати нижчу добротність  $Q$  (менший час  $\tau$

загасання амплітуди коливань в  $e$  разів, бо  $Q = \omega\tau/2$ ) ніж стояча хвиля, вузли якої лежать на місцях розташування джерел демпфування. Для того, щоб зрозуміти характер дрейфу стоячої хвилі, розкладемо стоячу хвилю на складові вздовж двох головних осей демпфування (суцільна і пунктирна осі на рис.2.15). Амплітуди цих двох компонентів демпфування згасають зі швидкістю  $1/\tau_1$  та  $1/\tau_2$  відповідно. Так як система управління поповнює ці втрати з тією ж швидкістю, а амплітуда контуру управління підтримує квадратний корінь з суми квадратів амплітуд двох хвиль на заданій величині (тобто  $r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ , то компоненти з більш низькою постійною часу демпфування повністю згасають, і стояча хвиля, зрештою, встановлюється по осі найменшої постійної часу  $\tau_1$ .

На рис.2.16 наведено графік дрейфу стоячої хвилі в залежності від кута  $\theta$  розташування хвилі.

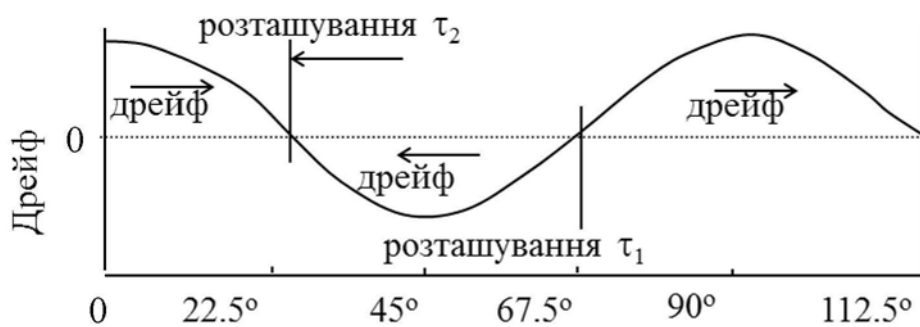


Рис.2.16. Дрейф, орієнтований по корпусу

Ця синусоїдальна крива в піковому значенні пропорційна різниці:  $\Delta(1/\tau) = 1/\tau_1 - 1/\tau_2$ , де  $\tau_1 < \tau_2$ .

### 2.4.3. Методика проведення балансування металевого резонатора

Процес балансування резонатора починається виміром по 2-м осях різночастотності, різнодобротності, кутового положення осі коливання генеруючої стоячій хвилі щодо електродів збудження [21].

Рівняння стоячої хвилі, що генерується щодо електродів збудження має наступний вигляд:

$$W(\varphi, t) = A \cos 2(\varphi + \varphi_0) \cos Ft, \quad (2.32)$$

де  $\varphi$  – окружний кут резонатора,  $\varphi_0$  – кут орієнтації хвилі відносно електрода збудження.

Для отримання даних параметрів, вимірювальна система на резонансній частоті фіксує по вимірюваній осі: частоту  $F$ , амплітуду пучності  $A_{nr}$ , амплітуду вузла  $N$ , квадратурну  $C$  і синфазну складову  $S$  вузла, добротність  $Q$ .

На першому етапі балансування різночастотність по 2-м вимірюваним осям визначає 4-та форма дебалансу, яка усувається послідовним зняттям маси в 4-х точках щодо осі з меншою частотою (більшою масою), орієнтація яких щодо важкої осі обчислюється за формулою:

$$\varphi_0 = \pm \frac{1}{2} \arctg \frac{N}{A_{nr}}. \quad (2.33)$$

Знак  $\varphi_0$  залежить від фазисигналу вузла по відношенню до пучності ( $0^\circ - 180^\circ$ ):

- при  $0^\circ$  – кут позиціонування знаходиться за годинниковою стрілкою щодо важкої осі;
- при  $180^\circ$  – кут позиціонування знаходиться проти годинниковою стрілкою щодо важкої осі.

Величина маси  $\Delta m$ , яку необхідно видалити, визначається за формулою:

$$\Delta m = \left( \frac{\Delta F}{F} \right) M, \quad (2.34)$$

де  $M$  – модальна маса.

Для резонатора з потовщеним ободом можна вважати, що модальна маса дорівнює масі ободу:

$$M = \pi D d h \rho, \quad (2.35)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр резонатора,  $d$  – товщина обода,  $h$  – висота обода,  $\rho$  – густина матеріалу резонатора.

Маса знімається точково в точках  $\varphi_0, \varphi_0 + 90^\circ, \varphi_0 + 180^\circ, \varphi_0 + 270^\circ$ .

Так як знімати масу необхідно з 4-х точках симетрично розташованих по колу (через  $90^\circ$ ), то з кожної точки знімається маса рівна  $\Delta m / 4$ .



Після цього запускається цикл вимірювання параметрів резонатора по 2-х осях.

Здійснюється необхідна кількість проходів зняття мас і вимірювань, поки різночастотність між двома осями не стане  $\Delta F \leq 0,01$  Гц, кут орієнтації хвилі щодо важкої власної осі повинен бути  $\varphi_0 \leq 2^\circ$ .

#### 2.4.4. Визначення дибалансу мас резонатора по четвертій формі дефекту

Після отримання необхідних параметрів визначаємо кут позиціонування видалення мас в 4-х точках.

При нерівності резонансних частот по 2-х осях  $F_1 < F_2$  відбувається видалення невідновленої маси резонатора в чотирьох точках:

– відраховуючи кут від осі 1 проти годинникової стрілки, дивлячись зверху, якщо фаза сигналу вузла щодо сигналу пучності дорівнює  $180^\circ$  (рис.2.17);

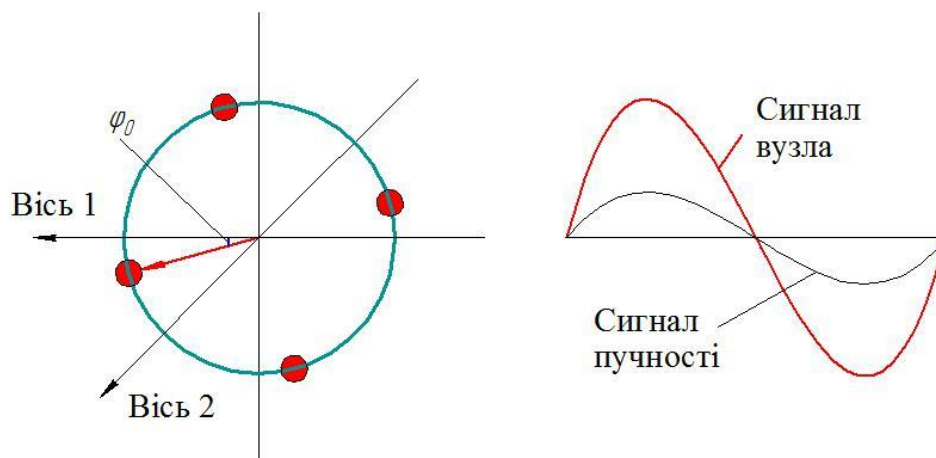


Рис.2.17. Місця невідновленості маси резонатора по четвертій формі дефекту при синфазних амплітудах пучності та вузла та при  $F_1 < F_2$

– відраховуючи кут від осі 1 за годинниковою стрілкою, дивлячись зверху, якщо фаза сигналу вузла щодо сигналу пучності дорівнює  $0^\circ$  (рис.2.18);

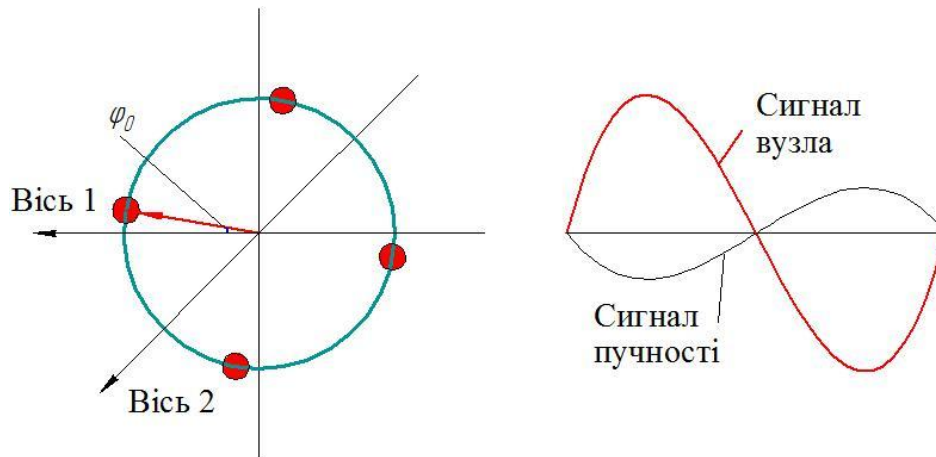


Рис.2.18. Місця невірноваженості маси резонатора по четвертій формі дефекту при протифазних амплітудах пучності та вузла та при  $F_1 < F_2$

При нерівності резонансних частот по 2-х осях  $F_1 > F_2$  відбувається видалення невірноваженої маси резонатора в чотирьох точках:

– відраховуючи кут від осі 2 за годинниковою стрілкою, дивлячись зверху, якщо фаза сигналу вузла щодо сигналу пучності дорівнює  $180^\circ$  (рис.2.19);

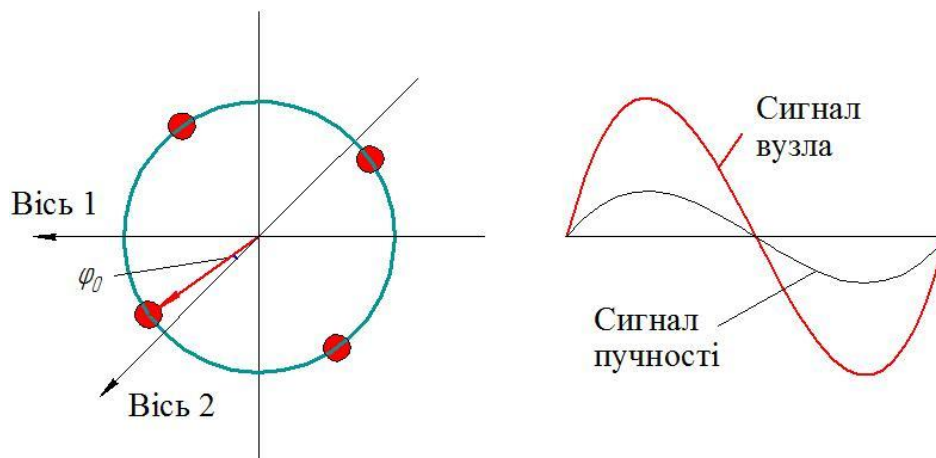


Рис.2.19. Місця невірноваженості маси резонатора по четвертій формі дефекту при синфазних амплітудах пучності та вузла та при  $F_1 > F_2$

– відраховуючи кут від осі 2 проти годинникової стрілки, дивлячись зверху, якщо фаза сигналу вузла щодо сигналу пучності дорівнює  $0^\circ$  (рис.2.20).

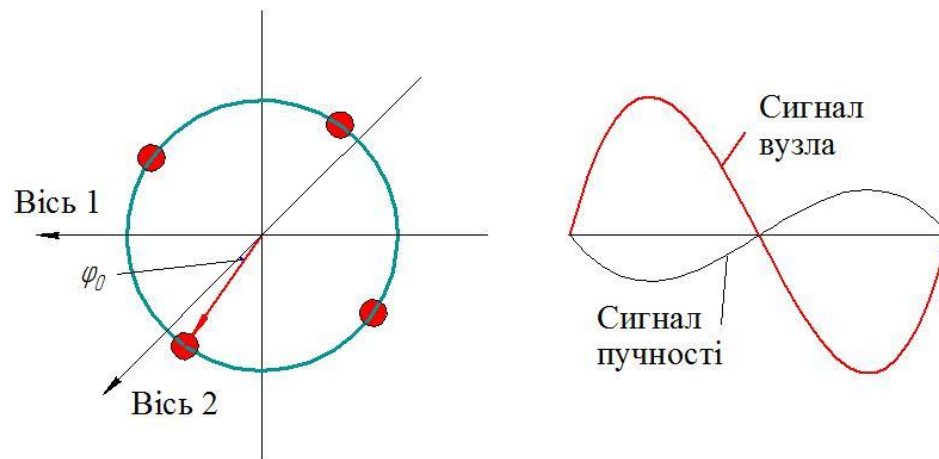


Рис.2.20. Місця неврівноваженості маси резонатора по четвертій формі дефекту при протифазних амплітудах пучності та вузла та при  $F_1 > F_2$

Маючи ці закономірності побудуємо програму проведення балансування металевого резонатора (рис.2.21).

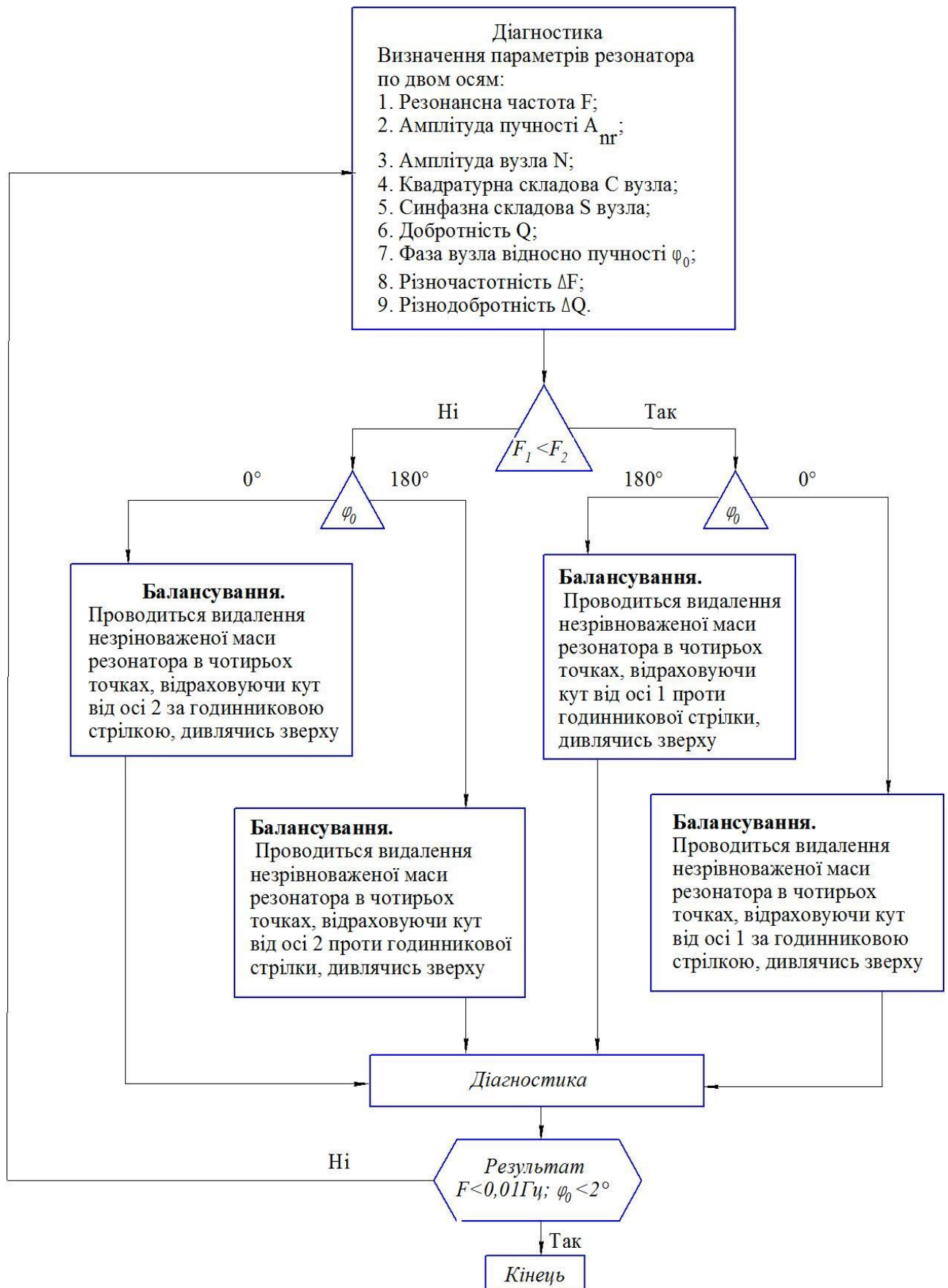


Рис.2.21. Програма проведення балансування металевго резонатора

Для проведення розрахунків була розроблена спеціальна електронна таблиця. Вносячи до неї параметри резонансної частоти, амплітуд пучності і вузла, фазність амплітуд по осях 1 і 2, вона автоматично визначає різночастотність, кут орієнтації хвилі збудження по осях 1 і 2, значення маси металу, яку необхідно видалити з кромки резонатора і кути точок зняття маси.

Після задання частот, при яких досягається рівень 0,707 від амплітуди пучності, визначається добротність резонаторів по кожній з осей і їх різнодобротність згідно методики по акустичній перевірці.

#### 2.4.5. Розробка робочого місця для балансування резонатора

Враховуючи властивості параметрів, що необхідно виміряти та умови для позиціонування резонатора при знятті невірноваженої маси резонатора запропонована уніфікована схема робочого місця, що дозволяє не переставляючи резонатор на окремі місця провести діагностику параметрів та видалення матеріалу з кромки резонатора [22]. Функціональна схема робочого місця для балансування приведена на рис.2.22.

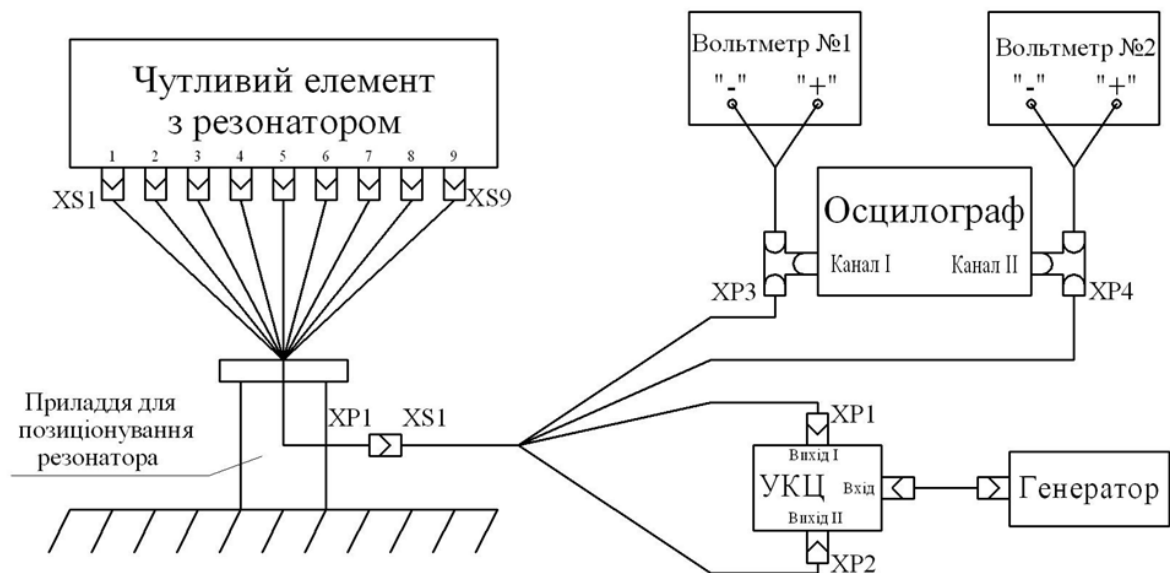


Рис.2.22. Функціональна схема робочого місця для балансування резонатора у складі генератора коливань

Всі елементи приладдя встановлені на одній основі, що дозволяє зробити точну виставку його складових частин один відносно одного. В якості

поворотного пристрою була обрана спеціальна поворотна платформа, яка дозволяє повернути генератор коливань на певний кут з точністю 15 кут.сек. (рис.2.23).

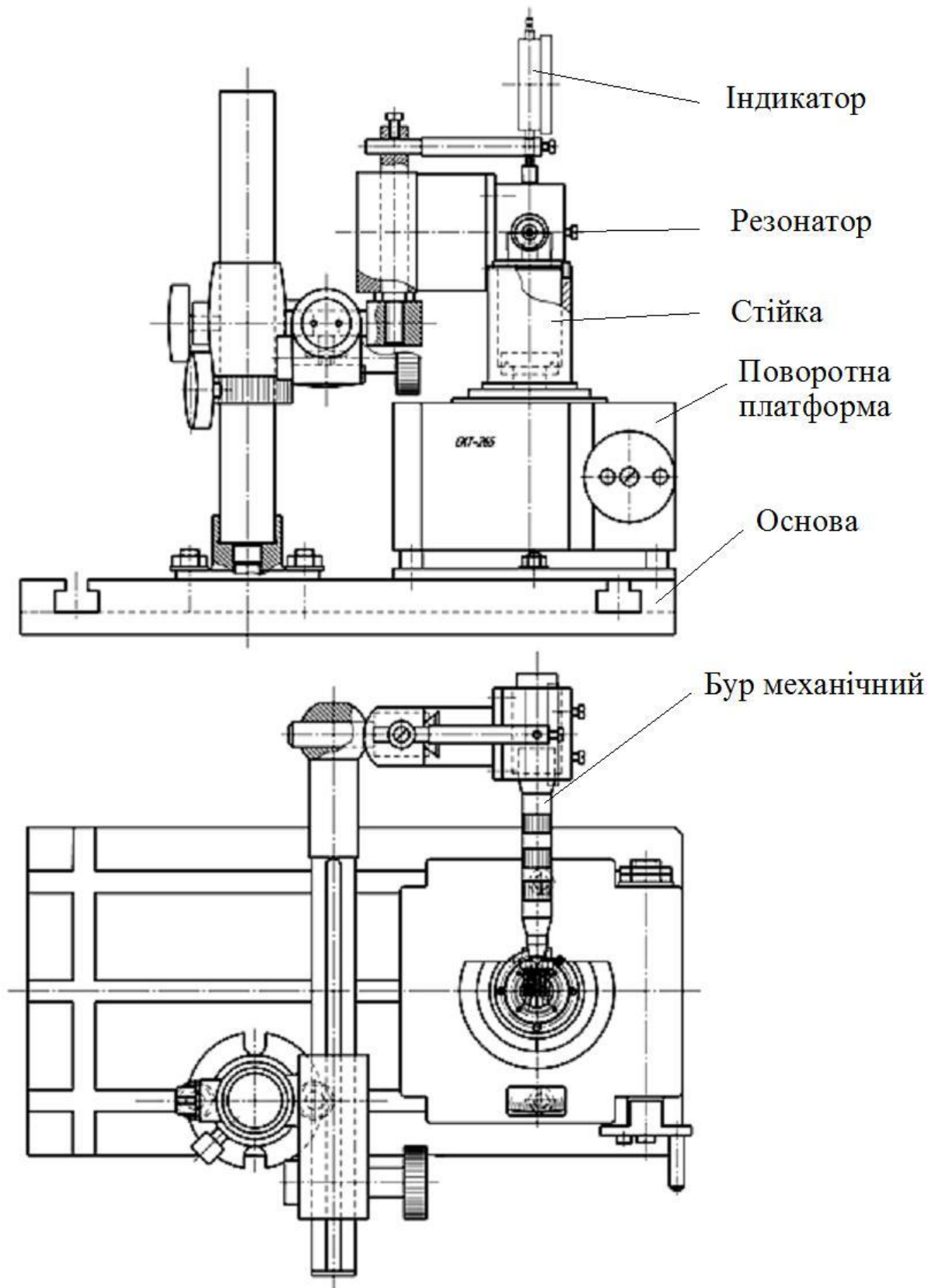


Рис.2.23. Приладдя для позиціонування резонатора

В стійку, на яку встановлюється генератор коливань, поміщений спеціальний кабель, роз'єми якого з'єднуються з кожним із гермовиводів генератора, що дозволяє знімати сигнал з кожної пари п'єзокерамічних пластин, приклеєних на резонаторі.

Також був розроблений і виготовлений комутатор ланцюгів (УКЦ), який дозволяє подавати напругу на канал збудження генератора коливань по осях 1 або 2 (рис.2.24).

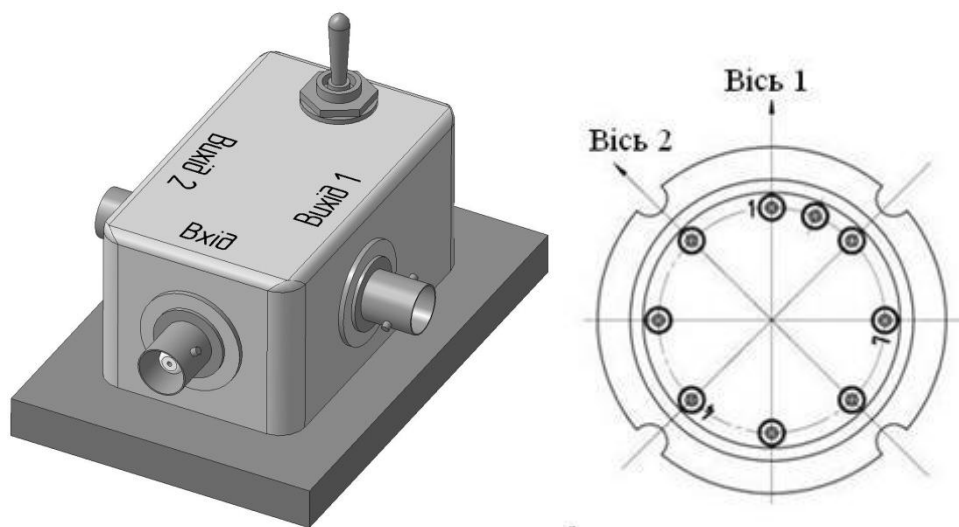


Рис.2.24. Комутатор ланцюгів та осі збудження генератора коливань

При проведенні діагностики параметрів резонатора за допомогою генератора встановлюється резонансна частота по кожному з каналів і по показникам вольтметрів визначається максимальне значення амплітуд пучності та вузла. Фазність сигналів пучності та вузла відображається на екрані двоканального осцилографа.

За допомогою (2.33) та (2.34) визначаються кут розташування невідноваженої маси  $\varphi_0$  та маса матеріалу  $\Delta m$ , яку необхідно видалити. Обертаючи резонатор за допомогою поворотної платформи виставляємо необхідні кутові положення. Видалення маси відбувається механічним шляхом за допомогою буру з різними типами насадок (підбираються в залежності від кількості матеріалу, який необхідно видалити). Для ідентичного видалення маси, переміщення буру контролюється індикатором.

### 2.4.6. Результат балансування резонатора в складі генератора коливань

Розроблене робоче місце та методика проведення балансування металевого резонатора у складі генератора коливань були впроваджені у процес виробництва чутливих елементів КВГ.

Балансуванню піддаються усі резонатори, що пройшли випробування акустичним методом. На прикладі балансування одного резонатора покажемо правильність проведення усіх операцій.

Параметри резонатора при діагностиці по осі 1 та осі 2 зазначено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Параметри резонатора по осі 1 та осі 2

	Резонансна частота, Гц	Амплітуда пучності, мВ	Амплітуда вузла, мВ	Фаза сигналу амплітуд між пучністю та вузлом
Збудження по осі 1	$F_1 = 5298,71$	$A_{nr1} = 523,7$	$N_1 = 50,1$	Противфазність
Збудження по осі 2	$F_2 = 5299,12$	$A_{nr1} = 560$	$N_2 = 47,3$	Фазність

Визначені кут орієнтації хвилі збудження по осях 1 і 2, значення маси металу, яку необхідно видалити з кромки резонатора і кути точок зняття маси представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Визначені параметри балансування

Різничас- тотність $\Delta F$ , Гц	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 1, $\varphi_{01}$ , град	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 2, $\varphi_{02}$ , град	Кути точок зняття маси, град	Маса, яку необхідно видалити $\Delta m/4$ , мг
0,41	2,73	2,41	2,73 92,73 182,73 272,73	0,121



Після видалення маси в зазначених чотирьох точках проводиться повторна діагностика параметрів, які представлені в таблиці 2.4 по осях 1 та 2 відповідно.

Таблиця 2.4

## Параметри резонатора по осі 1 та осі 2

	Резонансна частота, Гц	Амплітуда пучності, мВ	Амплітуда вузла, мВ	Фаза сигналу амплітуд між пучністю та вузлом
Збудження по осі 1	$F_1 = 5296,95$	$A_{nr1} = 508,5$	$N_1 = 23,6$	Противфазність
Збудження по осі 2	$F_2 = 5296,79$	$A_{nr1} = 561,6$	$N_2 = 38,1$	Фазність

Визначені кут орієнтації хвилі збудження по осях 1 і 2, значення маси металу, яку необхідно повторно видалити з кромки резонатора і кути точок зняття маси представлені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

## Визначені параметри балансування

Різничас- тотність $\Delta F$ , Гц	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 1, $\varphi_{01}$ , град	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 2, $\varphi_{02}$ , град	Кути точок зняття маси, град	Маса, яку необхідно видалити $\Delta m/4$ , мг
0,16	1,33	1,94	46,94 136,94 226,94 316,94	0,047

Після видалення маси в зазначених чотирьох точках проводиться діагностика параметрів, які представлені в таблиці 2.6 по осях 1 та 2 відповідно.

Таблиця 2.6

## Параметри резонатора по осі 1 та осі 2

	Резонансна частота, Гц	Амплітуда пучності, мВ	Амплітуда вузла, мВ	Фаза сигналу амплітуд між пучністю та вузлом
Збудження по осі 1	$F_1 = 5295,85$	$A_{nr1} = 510,5$	$N_1 = 10,8$	Фазність
Збудження по осі 2	$F_2 = 5295,84$	$A_{nr1} = 569,2$	$N_2 = 20,7$	Фазність

Визначені кути орієнтації хвилі збудження по осях 1 і 2, значення маси металу, яку необхідно повторно видалити з кромки резонатора і кути точок зняття маси представлені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

## Визначені параметри балансування

Різничас- тотність $\Delta F$ , Гц	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 1, $\varphi_{01}$ , град	Кут орієнтації хвилі відносно електродів збудження по осі 2, $\varphi_{02}$ , град	Кути точок зняття маси, град	Маса, яку необхідно видалити $\Delta m/4$ , мг
0,01	0,61	1,04	43,96 133,96 223,96 313,96	0,003

Як видно з таблиці 2.7, параметри  $\Delta F$  та  $\varphi_0$  відповідають зазначеним вимогам ( $\Delta F \leq 0,01$ ,  $\varphi_0 \leq 2^\circ$ ).

Генератор коливань піддається термостабілізація – 10 циклів охолодження до  $-50^\circ\text{C}$  зі швидкістю до  $2^\circ\text{C}/\text{хв.}$  і витримці 2 години на вказаній температурі, нагріву до  $+75^\circ\text{C}$  зі швидкістю до  $5^\circ\text{C}/\text{хв.}$  і витримці 2 години на вказаній температурі. Після термостабілізація проводимо термостаріння при температурі генератора коливань  $+75^\circ$  протягом 120 годин.

Після зазначених температурних впливів проводимо діагностику параметрів резонатора та визначаємо його добротність по осям 1 та 2 та різнодобротність.

Скориставшись методикою визначення добротності, описаної в методиці перевірки параметрів резонатора акустичним методом, визначаємо значення

частот на рівні 0,707 від значення резонансної частоти та підставляючи в (2.4) обчислюємо добротність по кожній з осей.

Різностдобротність визначається як різницю добротностей по кожній з осей:

$$\Delta Q = |Q_1 - Q_2|. \quad (2.36)$$

Кінцеві параметри резонатора після балансування представлені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Параметри резонатора після балансування

Номер осі	Резонансна частота $F$ , Гц	Різностчастотність $\Delta F$ , Гц	Кут орієнтації хвилі відносно електроду збудження $\varphi_0$ , град	Частота на рівні 0,707 від резонансної частоти, Гц		Добротність, $Q$	Різностдобротність, $\Delta Q$
				$F_1$	$F_2$		
1	5293,64	0,01	0,85	5293,48	5293,78	17652,8	608,7
2	5293,63		1,07	5293,49	5293,78	18261,5	

Параметри, зазначені в таблиці 2.8, заносяться до супровідної документації, а генератори коливань передаються на збірку чутливого елементу КВГ.

## 2.5. Неортогональності осі чутливості до монтажно́ї поверхні вібраційного гіроскопу

Віссю чутливості (ВЧ) гіроскопа називається напрямок його максимальної чутливості до заданої кутової швидкості. Позитивний напрямок осі чутливості визначається як напрямок, з боку якого обертання відбувається проти годинникової стрілки.

При вимірюванні кутової швидкості рухомого об'єкту, ВЧ гіроскопа встановлюється паралельно до однієї з осей об'єкта. Наприклад, при

встановленні осі чутливості гіроскопа паралельно до поздовжньої осі об'єкта – гіроскоп вимірює кутову швидкість крену. Зазвичай, при невисоких вимогах до колінеарності між ВЧ і заданою віссю системи координат (тобто віссю крену, тангажу і рискання об'єкта), на об'єкті конструктивно виконується монтажна поверхня таким чином, щоб при встановленні гіроскопа на це місце монтажу його ВЧ була паралельною заданій осі об'єкта [23].

Однак через похибки виготовлення та збирання гіроскопа його вісь чутливості стає неортогональною по відношенню до монтажної поверхні і, отже не збігається з необхідною віссю об'єкта. Для вібраційного гіроскопу з циліндричним резонатором ці похибки можуть бути наступними: не перпендикулярність між дном циліндра та твірною поверхнею, не перпендикулярність монтажу резонатора на основу, не точне встановлення чутливого елементу в корпус гіроскопа та ін. За рахунок розбіжності між ВЧ з перпендикуляром монтажної поверхні гіроскопу, в показаннях приладу будуть присутні кутові швидкості обертання навколо третьої осі системи координат, пов'язаної з об'єктом.

Для визначення похибок, пов'язаних з неортогональністю осі чутливості гіроскопа до його монтажної поверхні, введемо пов'язану з об'єктом систему координат  $X_a Y_a Z_a$  представлену на рис.2.25, де  $X_a$  – вісь крену,  $Y_a$  – вісь тангажу,  $Z_a$  – вісь рискання.

Ця система координат визначає монтажну поверхню гіроскопа. Введемо також пов'язану з гіроскопом систему координат  $X_g Y_g Z_g$ ,  $Z_g$  – ВЧ гіроскопа,  $Y_g$  – вісь, перпендикулярна осі чутливості і спрямована в бік роз'єму гіроскопа розташованого на його корпусі,  $X_g$  – вісь, перпендикулярна ВЧ і спрямована так, що три вектори становлять праву трійку.

Ці дві системи координат повернені одна відносно іншої на два кути  $\alpha$  і  $\beta$ , які визначають неортогональність осі чутливості гіроскопа до монтажної поверхні [24].

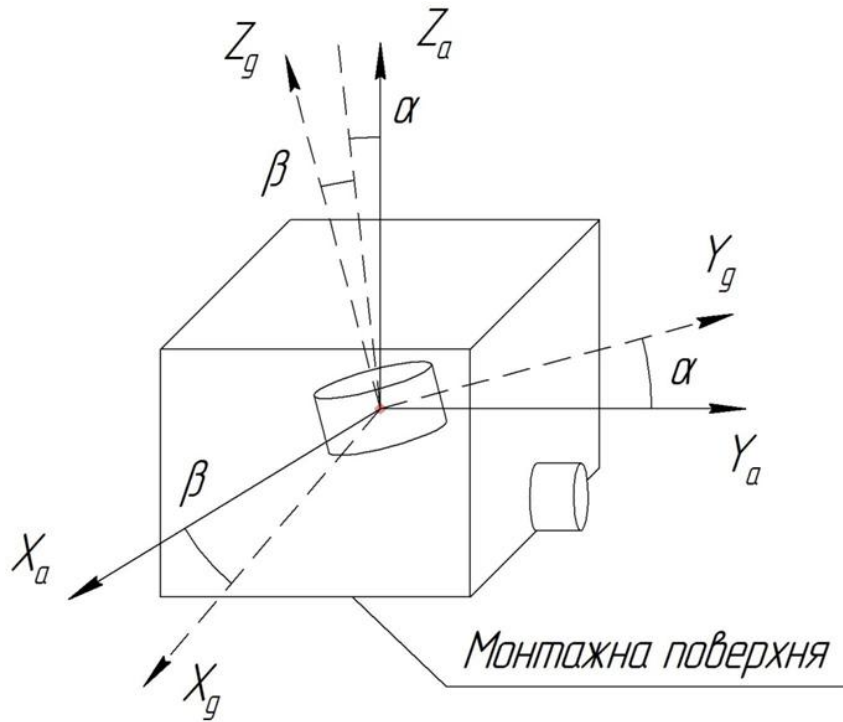


Рис.2.25. Неортогональність осі чутливості гіроскопа до монтажної поверхні

Якщо кути  $\alpha$  і  $\beta$  не задовольняють вимогам точності виставки, то їх необхідно визначати (паспортизувати) і враховувати при вимірі кутової швидкості. Мета цього обліку полягає в розділенні складових кутової швидкості шляхом множення на матрицю повороту двох систем координат, яка запишеться наступним чином:

$$A_g^a = \begin{pmatrix} X_g & Y_g & Z_g \\ X_a & \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ Y_a & \sin\alpha & \cos\alpha & -\cos\beta\sin\alpha \\ Z_a & -\sin\beta\cos\alpha & \sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Так як гіроскоп вимірює кутову швидкість в системі координат  $X_g Y_g Z_g$  пов'язаної з ВЧ гіроскопа, а нам потрібно знати кутову швидкість в системі координат, пов'язану з об'єктом (монтажної поверхні розташованої на об'єкті)  $X_a Y_a Z_a$ , то матрицю значень гіроскопа необхідно помножити на матрицю  $A_g^a$ , тоді отримаємо:

$$\begin{pmatrix} \Omega_{X_a} \\ \Omega_{Y_a} \\ \Omega_{Z_a} \end{pmatrix} = A_g^a \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_{Z_g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ \sin\alpha & \cos\alpha & -\cos\beta\sin\alpha \\ -\sin\beta\cos\alpha & \sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_{Z_g} \end{pmatrix}. \quad (2.38)$$

Гіроскоп вимірює кутову швидкість  $\Omega_{Z_g}$ , тобто її проекцію на ВЧ. Кутова швидкість в проекціях на систему координат  $X_a Y_a Z_a$ , пов'язану з об'єктом визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}\Omega_{X_a} &= \Omega_{Z_g} \sin \beta; \\ \Omega_{Y_a} &= -\Omega_{Z_g} \cos \beta \sin \alpha; \\ \Omega_{Z_a} &= \Omega_{Z_g} \cos \beta \cos \alpha.\end{aligned}\quad (2.39)$$

Таким чином, кутові швидкості розділені і можуть бути використані для більш точного вимірювання кутової швидкості кожної вісі, пов'язаної з об'єктом системи координат  $X_a Y_a Z_a$ .

В вібраційному гіроскопі ця методика реалізована з використанням спеціальної комп'ютерної програми, яка обчислює середні значення вимірюваних сигналів під час обертання вібраційного гіроскопа при двох орієнтаціях його осі чутливості, і в результаті отримуємо позитивні  $N_1^+$ ,  $N_2^+$  і негативні  $N_1^-$ ,  $N_2^-$  значення кутової швидкості.

$$N_1^+ = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N_{i,1}^+; \quad N_1^- = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N_{i,1}^-; \quad N_2^+ = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N_{i,2}^+; \quad N_2^- = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N_{i,2}^- \quad (2.40)$$

Визначимо кути  $\alpha$  і  $\beta$  – кути неортогональності осі чутливості вібраційного гіроскопа до монтажною поверхні за формулами:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arcsin \left( \frac{N_1^+ - N_1^-}{2 \cdot \Omega \cdot SF} \right); \\ \beta &= \arcsin \left( \frac{N_2^+ - N_2^-}{2 \cdot \Omega \cdot SF} \right),\end{aligned}\quad (2.41)$$

де  $\Omega$  – кутова швидкість,  $SF$  – масштабний коефіцієнт вібраційного гіроскопа.

Підставляючи значення масштабного коефіцієнту  $SF$ , кутової швидкості  $\Omega$  та середні значення вимірюваних сигналів для приладу КВГ отримаємо  $\alpha = 0,1^\circ$  та  $\beta = 0,12^\circ$ .

Визначення кутів відхилення осей чутливого елемента гіроскопа відносно монтажною поверхні дозволить скорегувати вихідні сигнали за допомогою введення коефіцієнтів компенсації до його математичної моделі.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Проведено перевірку зразків основних параметрів металевого резонатору за допомогою розробленого акустичного методу. Спроектоване спеціальне робоче місце та визначені резонансні частоти, різночастотності, добротності, різнодобротності зразків резонаторів.

Проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі похибок позиціонування п'єзокераміки на точність КВГ. Визначено допустимі параметри різночастотності ( $\Delta F \leq 0,01$  Гц) та кута орієнтації хвилі ( $\delta\varphi \leq 2^\circ$ ).

Розроблено спеціальне приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора з отворами на його дні та на твірній поверхні з урахуванням розрахованих допустимих зміщень п'єзокераміки ( $\Delta=90$  мкм).

Проаналізовано вплив похибок, що обумовлені різною жорсткістю, неоднорідністю матеріалу резонатора на основні характеристики КВГ. Представлені математичні вирази похибок.

Представлено теоретичні основи динамічного балансування металевого резонатора для зменшення параметрів різночастотності та кута орієнтації хвилі.

Розроблено методику балансування металевого резонатора та визначення дебалансу мас по четвертій формі дефекту.

Розроблено робоче місце для балансування резонатора, проведено балансування дослідних зразків генераторів коливань та визначено їх основні характеристики.

Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елемента до монтажною поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка ( $\alpha = 0,1^\circ$ ,  $\beta = 0,12^\circ$ ).

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Степаненко О.О. Дослідження точності оброблення на токарному верстаті зі шпинделем на гідростатичних опорах /О.О. Степаненко, М.Ю. Манжола, Ю.М. Кузнєцов // Вісник Чернігівського державного

технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник . — Черніг. нац. технол. ун-т, Чернігів, 2015. — №2(78). — С.104-113.

2. Патент на корисну модель 125819 Україна, Спосіб виготовлення резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа / В.С. Антонюк, А.О. Возняковський, А.І. Пономаренко, В.Г. Цірук; опубл.25.05.2018, Бюл. №10.

3. Цірук В.Г. Визначення параметрів металевого резонатора вібраційного гіроскопа акустичним методом /В.Г. Цірук // Вісник Черкаського державного технологічного університету . — 2018. — №3. — С.74-79.

4. Халютин О.С. Оптимизация параметров стоячей волны полусферического резонаторного гироскопа /О.С. Халютин // Научный вестник МГТУ ГА. — 2017. — №20(1). — С.232-241.

5. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE std.1431TM. — 2004. — P.79.

6. Зинер К. Упругость и неупругость металлов /К. Зинер, ред. С.В. Воносковский.— М.: ИЛ. , 1954. — 254 С.

7. Патент 2147117 МПК 7G01C 19/56. Способ балансировки резонаторов волнового твердотельного гироскопа / Б.П. Бодунов, В.М. Лопатин, Б.С. Лунин.

8. Каленова Н.В. Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа /Ю.К. Жбанов, Н.В. Каленова // Механика твердого тела. — 2001. — №3. — С.11-18.

9. Матвеев В.А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа /В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин.— Москва. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.

10. Басараб М.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах /В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб.— Москва. : Физмалит, 2008. — 240 С.

11. Петренко А.В. Балансировка металлического резонатора вибрационного гироскопа /А.В. Петренко // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2017». — 19-21 квітня, НАУ, Київ, 2017. — С.9.46-9.50.



12. Петренко О.В. Балансування металевого резонатора вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM». — НАУ, Київ, 2018. — С.82.

13. Лунин Б. С. Особенности балансировки металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов /Чуманкин Е.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. // Динамика сложных систем - XXI век. — 2018. — №4. — С.85–95

14. Басараб М.А. Динамическая поверхностная балансировка оболочек резонаторов волновых твердотельных гироскопов/Чуманкин Е. А., Лунин Б.С., Басараб М.А. // Динамика сложных систем - XXI век — 2017. — Т. 11, № 3. — С. 11–15.

15. Басараб М.А. Точечная балансировка по массе волнового твердотельного гироскопа с цилиндрическим резонатором / М. А. Басараб, Б. С. Лунин, С. В. Фетисов, Е. А. Чуманкин // Инженерная физика. — 2017. — № 12. — С. 29–37.

16. Матвеев В.А. Идентификация неоднородности распределения массы резонатора волнового твердотельного гироскопа /В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 1997. — №1. — С.104-108.

17. Балансировка металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов низкой и средней точности / В. А. Матвеев, Б. С. Лунин, М. А. Басараб, Е. А. Чуманкин // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (электронный журнал). — 2013. — № 6— С.251-266.

18. Жбанов Ю.К. О балансировке волнового твердотельного гироскопа /Ю.К. Жбанов, В.Ф. Журавлев // Изв. РАН. Сер. «Механика твердого тела». — 1998. — №4. — С.4-16.

19. Лунин Б.С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов /Б.С. Лунин.— Издательство МАИ, 2005. — 224 С.

20. ЛунинБ.С. Влияние неоднородности толщины оболочки волнового твердотельного гироскопа на параметры дебаланса / М.А. Басараб, В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, С.В. Фетисов // Гироскопия и навигация. — 2016. — Т.24, № 4. — С.14-24.

21. Квасніков В. Метод балансування резонатора вібраційного гіроскопу. Основні технічні вказівки /В. Квасніков, В. Галицький // Четверта міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017). — 31 жовтня – 2 листопада, Вінниця, ПП «ТД «Едельвейс і К» 2017. — С.81-83.

22. Розробка вимог до обладнання та алгоритмів балансування резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа : звіт про НДР № 744-X11 / НАУ; керівн. : Чіковані В.В.; викон. : В.М. Азарсков, В.В. Чіковані. 2011. — 57 С.

23. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейна для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — Видавництво «Молодий вчений» 2019. — №7(71). — С.1-5.

24. Цірук В.Г. Не ортогональності осі чутливаості до монтажної поверхності вібраційного гіроскопа /В.Г. Цірук, О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Вісник інженерної академії України. — Київ, 2017. — №3. — С.158-160.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЖИМИ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА

#### 3.1. Шляхи підвищення точності системистабілізації блоку озброєння

Прискорення пошуку та визначення координат рухомих об'єктів в екстримальних умовах; спостереження за наземними, повітряними та надводними просторами; уточнення та розробка сучасних навігаційних карт вимагають створення високоточних систем стабілізації (СС) бортових систем навігації та керування рухом.

Одним із сучасних напрямків побудови СС, наведення та локації об'єктів пошуку 5-го покоління є застосування в їх складі високочутливих оптико-електронних приладів зі стабілізованим полем зору, що забезпечують цілодобове виконання завдань. Існуючі оптико-електронні прилади навігаційних систем мають невеликі дальності виявлення та локації об'єктів пошуку. У результаті недостатньої точності, малого діапазону керуючих швидкостей, недостатньої завадостійкості та надійності вони не можуть бути використані у сучасних навігаційних системах рухомих об'єктів.

Нормальне функціонування різноманітних технологічних, виробничих процесів може бути забезпечене тільки тоді, коли важливі для цих процесів фізичні величини задовольняють певним умовам. Тобто, необхідно підтримувати постійність фізичних величин. Задачею стабілізації є компенсація впливу збурень з метою забезпечення практичної постійності керованих величин.

Всі ці причини обумовлюють необхідність розробки теорії та принципів побудови елементів і пристроїв комплексу стабілізатора озброєння, що забезпечують: високу точність наведення до 1 кут.хв. (існуючі СС забезпечують точність наведення не більше 3 кут.хв.); високу точність стабілізації лінії візування, похибка яких не більше 20 кут.сек. (існуючі системи стабілізації забезпечують похибку стабілізації 60 кут.сек.); можливість роботи в умовах дії

дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища: широкого спектра високочастотних коливань об'єкта носія – від 5 до 500 Гц.

На даний час на озброєнні Міністерства оборони України знаходяться легкоброньовані машини, для стабілізації блоку озброєння в яких використовуються аналогові стабілізатори, що виготовлялися ще у 80-х роках ХХ століття.

Існуючі комплекси системи стабілізації не можуть достатньо ефективно виконувати поставлені завдання. Науково-технічний прогрес у галузі вдосконалення компонентів елементної бази (як цифрових обчислювальних засобів, так і потужних електронних комутаторів, а також датчиків електричних і кінематичних параметрів) визначив необхідність удосконалення комплексів стабілізаторів шляхом покращення їх тактико-технічних характеристик (показників точності, швидкодії, розширення функціональних можливостей), забезпечення максимально можливої мінімізації собівартості апаратури.

### **3.1.1. Принцип дії системи стабілізації**

Розглянемо принцип дії існуючого стабілізатора озброєння СВУ-500[1]. Для зручності викладу принципу дії розглядається робота сукупності приладів і функціональних вузлів, що забезпечують стабілізацію й наведення у вертикальній і горизонтальній площинах, роздільно («привод ВН» і «привод ГН»). На рис.3.1 представлена функціональна схема приводу ВН.



Імпульсний сигнал з модулятора підсилюється в підсилювачі потужності ПП і надходить на обмотку якоря ЕДМ-ВН.

ЕДМ-ВН через механізм підйому і зубчастий сектор повертає БО у бік, протилежний відхиленню корпусу виробу, утримуючи його в напрямку на ціль з похибкою, обумовленою величиною похибки стабілізації.

Для одержання необхідних динамічних характеристик привода ВН (мінімальної похибки стабілізації і якості перехідного процесу) використовується сигнал зворотного зв'язку за швидкістю зміни похибки стабілізації, одержуваний підсумовуванням сигналу ТГ [3] із сигналом ГТ-К, і сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму ЕДМ-ВН, формований датчиком струму.

ГТ-К закріплений на башті і виробляє сигнал, пропорційний швидкості коливання башти у вертикальній площині, а ТГ, установлений на осі цапф БО, виробляє сигнал, пропорційний швидкості повороту БО щодо башти. Сума цих двох сигналів пропорційна швидкості зміни похибки стабілізації.

Сигнал датчика струму з ланки корекції та сигнал, пропорційний швидкості зміни похибки стабілізації (сума сигналів ТГ і ГТ-К), підсумовуються в підсилювачі підсумовуючому із сигналом інтегратора. Далі, після посилення й перетворення, сумарний сигнал надходить на ЕДМ-ВН.

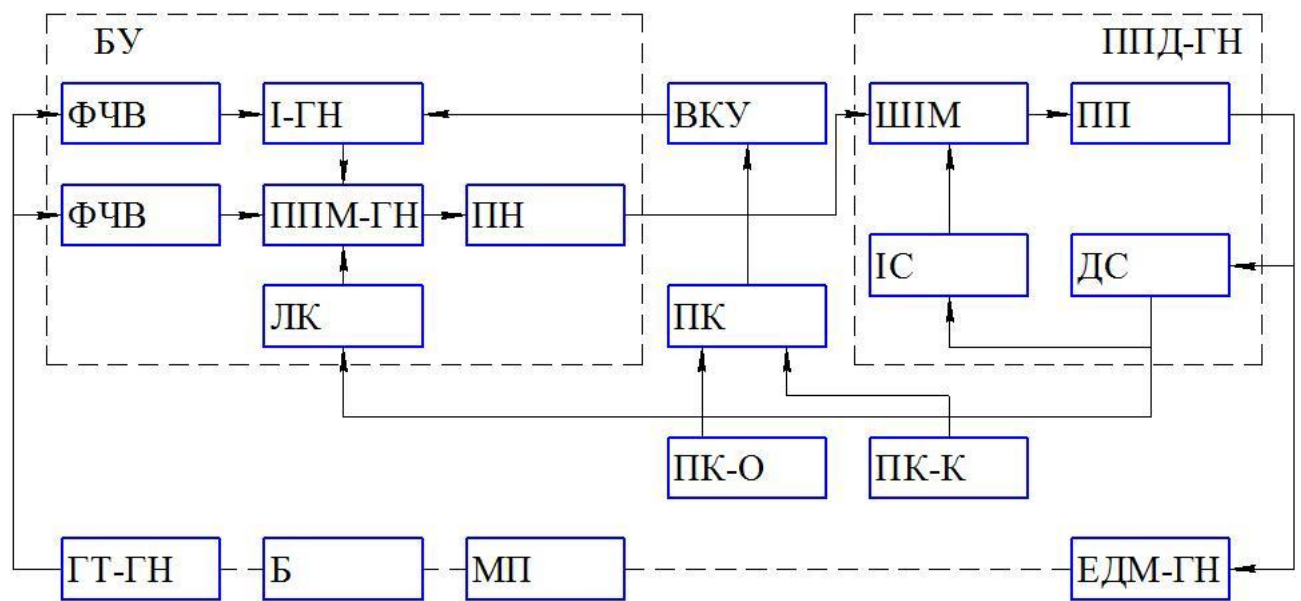
Для захисту електродвигуна ЕДМ і підсилювача потужності від перевантажень, які виникають при істотному збільшенні моментів опору повороту БО (і при заклинюванні БО), у тракті керування передбачений інтегральний захист щодо струму, що складається з інтегратора струму ІС і схеми обмеження струму в якорній обмотці двигуна ЕДМ.

Наведення БО у вертикальній площині здійснюється від ПК-О або ПК-К залежно від вибору, що задається на ПК. Сигнал наведення від обраного ПК-О (ПК-К) із шасі виробу через ВКУ надходить у башту (Б) на вхід інтегратора й підсумовується із сигналом ГТ-ВН. З виходу інтегратора сигнал, пропорційний сумі сигналів ГТ-ВН і ПК-О (ПК-К), надходить на підсилювач підсумовуючий, підсумується із сигналами датчика струму, ГТ-К, ТГ і далі, після посилення

іперетворення, сумарний сигнал надходить на ЕДМ-ВН. ЕДМ-ВН через механізм підйому повертає БО у напрямку та зі швидкістю, що відповідають знаку і величині сигналу ПК-О (ПК-К).

ГТ-ВН разом із ТГ вимірює тільки кутову швидкість відхилень БО і корпуса виробу в площині ВН, лінійні переміщення виробу по вертикалі, а відповідно і БО щодо цілі, а також переміщення самої цілі необхідно компенсувати наведенням БО на ціль від ПК-О (ПК-К).

На рис.3.2 представлена функціональна схема приводу ГН.



Примітка - ВКУ і ПК до складу СВУ-500 не входить

Рис.3.2. Схема функціональна приводу ГН

Основними елементами, що забезпечують роботу приводу ГН є: гіротахометр ГТ-ГН, пульти керування ПК-О (ПК-К), інтегратор І-ГН, підсилювач підсумовуючий ППМ-ГН, підсилювач напруги ПН, підсилювач потужності ППД-ГН, датчик струму ДС, ланка корекції ЛК, електродвигун ЕДМ-ГН і механізм повороту МПВ.

Принцип дії приводу ГН при стабілізації і наведенні аналогічний принципу дії приводу ВН.

На відміну від приводу ВН, де сигнал ГТ-ВН (аналогічний ГТ-ГН), надходить тільки на інтегратор, у приводі ГН сигнал ГТ-ГН надходить і на

інтегратор і на підсилювач підсумовуючий (замість суми сигналів ТГ і ГТ-К у приводі ВН).

ГТ-ГН вимірює тільки кутову швидкість переміщення БО в горизонтальній площині і тому лінійні переміщення виробу в горизонтальній площині, а відповідно і БО щодо цілі, а також переміщення самої цілі необхідно компенсувати наведенням БО на ціль від ПК-О(ПК-К).

Слід зазначити, що сучасні цифрові стабілізатори озброєння повинні мати автоматичне налаштування параметрів та автоматичну діагностику відмов його складових частин [4 – 6].

### **3.1.2. Підвищення точності стабілізації**

Аналіз приладового складу, структури й динамічних параметрів блоків стабілізаторів показав, що підвищення точності існуючої системи стабілізації неможливе, оскільки керуючі моменти електродвигунів ЕДМ-20 потужністю 400Вт достатні для подолання моментів, що збуджують у стаціонарних режимах, а в перехідних режимах, які мають місце при русі бронемашини по пересіченій місцевості, для компенсації швидких змін моментів, що збуджують, має значення швидкості наростання керуючих моментів і обертів ротора двигунів. Так як режимами роботи електродвигунів керують цифрові канали стабілізації, що включають гіротахметри ГТ46 із пружною торсіонною пружиною, що має смугу пропускання частот  $\approx 35$  Гц [7], числовий обчислювач із дискретністю роботи щодо часу рівному 2,5 мс і підсилювач потужності з LC-фільтром живлення з постійною часу 8 мс, то швидкодія стабілізаторів у перехідних режимах обмежена швидкодією зазначених блоків стабілізатора [8, 9].

Швидкодія характеризується смугою пропускання частот, постійними часу електродвигунів, підсилювачів і моментом інерції навантажень на електроприводи, а також дискретністю за часом цифрового обчислювача.

Підвищити смугу пропускання гіротахметрів ГТ46 неможливо у рамках збереження його принципу роботи – компенсація гіроскопічного моменту



пружною пружиною торсіона [10]. Підвищення швидкодії гіротахometrів досягається при використанні гіроскопів нового покоління – КВГ, у яких смуга пропускання може бути розширена до 100 Гц і більше [11, 12].

Крім підвищеної швидкодії гіроскопи КВГ мають не менш важливі переваги перед гіротахометрами ГТ46, а саме:

- КВГ не містить обертового з великою швидкістю ротора на швидкісних шарикопідшипниках, які обмежують ресурс ГТ46 до 500 годин, ресурс КВГ становить не менш 10 000 годин;

- вартість гіроскопа КВГ нижче ніж у ГТ46 приблизно в 2 рази, крім того для роботи гіроскопів КВГ не потрібне спеціальне джерело 3-х фазної змінної напруги.

Наступним фактором, що забезпечує підвищення точності стабілізації, є підвищення швидкості обробки інформації в цифровому обчислювачі блока керування.

Експериментальні дослідження виявили можливість зменшити індуктивність дроселів в LC-фільтрах підсилювачів потужності зі збереженням припустимого рівня пульсацій, створюваних силовими мостовими комутаторами, що працюють у режимі ШІМ на активно-індуктивне навантаження обмоток якорів електродвигунів.

У результаті цих досліджень постійну часу підсилювачів потужності зменшили до 0,3 мс у порівнянні з 8 мс.

Крім зазначених вище вдосконалень чутливих елементів цифрового обчислювача і підсилювачів потужності, у модернізованому стабілізаторі використовуються нові розроблені електродвигуни ЕДМ03 [13] та нові електроприлади наведення з підвищеними пусковими струмами й зниженими постійними часу, що також прискорює протікання перехідних процесів і збільшує швидкість стабілізатора при парированні збуджуючих динамічних моментів, які виникають при стрільбі й русі машини по пересіченій місцевості.

Усі ці вдосконалення реалізовані в системах стабілізації СВУ-500-7Ц, СВУ-500-7Ц-03 та СВУ-500-7Ц-04 [14–16].

Опишемо режими роботи КВГ, які можуть використовуватися в якості чутливих елементів сучасних стабілізаторів озброєння.

### 3.2. Режими роботи КВГ

КВГ є одним із останніх гіроскопічних технологій. Ця технологія за достатньо короткий час розповсюдилася по всьому світу не тільки тому, що продемонструвала якості, що відсутні у інших конкуруючих, в основному оптичних технологій (волоконно-оптичні гіроскопи(ВОГ) та кільцеві лазерні гіроскопи(КЛГ)), але і тому, що технологія КВГ, на відміну від ВОГ та КЛГ, піддається мікромініатюризації, що привела до створення мікромеханічних гіроскопів (МЕМС гіроскопів) [17].

Всі типи КВГ можуть працювати в різноманітних режимах [18]:

Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні, кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання.

Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. В цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості [19].

Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. В цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах.

Режим роботи з компенсацією тільки квадратурної компоненти сигналу (інтегруючий режим). В інтегруючому режимі роботи сили Коріоліса не компенсуються і в результаті накладання двох хвиль: первинної та вторинної, вібраційна стояча хвиля повертається вслід за обертанням корпусу КВГ з затримкою, що рівна коефіцієнту Брайана  $k \approx 0,4$  [20].

В перших трьох режимах КВГ вимірює кутову швидкість та є датчиком кутової швидкості. В четвертому режимі КВГ вимірює кут повороту та є інтегруючим гіроскопом.

### 3.2.1. Режим вимірювання кутової швидкості (КВГ-ДКШ)

Основні рівняння руху, які описують будь-який з існуючих режимів роботи КВГ і враховують всі головні його похибки називаються узагальненою моделлю КВГ і представляються у вигляді [21]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - k(2\Omega\dot{y} + \dot{\Omega}y) + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{x}\cos 2\theta_\tau + \dot{y}\sin 2\theta_\tau) + \\ + (F^2 - k'\Omega^2)x - F\Delta F(x\cos 2\theta_F + y\sin 2\theta_F) = f_x; \\ \ddot{y} + k(2\Omega\dot{x} + \dot{\Omega}x) + \frac{2}{\tau}\dot{y} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(-\dot{x}\sin 2\theta_\tau + \dot{y}\cos 2\theta_\tau) + \\ + (F^2 - k'\Omega^2)y + F\Delta F(-x\sin 2\theta_F + y\cos 2\theta_F) = f_y, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $F^2 = \frac{F_1^2 + F_2^2}{2}$ ;  $F\Delta F = \frac{F_1^2 - F_2^2}{2}$ ;  $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)$ ;  $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}$ .

У цих рівняннях, які описують коливання первинної моди по осі  $X$  і вторинної моди по осі  $Y$ , називаються рівняннями в швидких змінних, так як відхилення  $x$  та  $y$  від рівноважного положення резонатора по обох координатах відбуваються з частотою близькою до резонансної. У цих рівняннях враховано, що в резонаторі є дві осі з максимальною  $F_1$  і мінімальною  $F_2$  резонансними частотами коливань. Також, є дві осі з мінімальним  $\tau_1$  і максимальним  $\tau_2$  часом загасання вільних коливань, що еквівалентно мінімальній  $Q_1$  і максимальній  $Q_2$  добротності резонатора, так як  $\tau = 2Q / F$ . Причому, вісь мінімальної резонансної частоти має кут  $\theta_F$  з напрямком первинних коливань, а вісь мінімальної добротності становить кут  $\theta_\tau$  з напрямком первинних коливань, як показано на рис.3.3.



Рис.3.3. Кути мінімальної частоти та добротності

У рівняннях (3.1) передбачені керуючі силові дії  $f_x$  та  $f_y$  по кожній з осей  $X$  і  $Y$  коливань. Крім того, враховуються члени, обумовлені наявністю кутового прискорення  $\dot{\Omega}$  доцентрового прискорення  $\Omega^2$ , які при побудові системи керування хвилею не враховуються в зв'язку з їх малістю. Дійсно,  $\dot{\Omega}x$  менше, ніж  $\dot{x}\Omega$  в стільки разів, у скільки резонансна частота більше частоти зміни вимірюваної кутової швидкості, зазвичай приблизно в 40-50 раз, а  $\Omega^2$  менше  $F^2$  приблизно в  $10^4$  разів.

Рівняння (3.1) запишемо в наступному вигляді:

$$\ddot{x} - 2k\Omega\dot{y} + d_{xx}\dot{x} + d_{xy}\dot{y} + k_{xx}x + k_{xy}y = f_x; \quad (3.2)$$

$$\ddot{y} + 2k\Omega\dot{x} + d_{yx}\dot{x} + d_{yy}\dot{y} + k_{yx}x + k_{yy}y = f_y,$$

де  $k$  – коефіцієнт Брайана,  $d_{xx} = 2/\tau + \Delta(1/\tau)\cos 2\theta_t$  – коефіцієнт демпфування коливань по осі  $X$ ,  $2/\tau = 1/\tau_1 + 1/\tau_2$ ,  $\Delta(1/\tau) = 1/\tau_1 - 1/\tau_2$ , де  $\tau_1$  – мінімальна стала часу,  $\tau_2$  – максимальна стала часу резонатора,  $d_{xy} = \Delta(1/\tau)\sin 2\theta_t$  – перехресне демпфування,  $k_{xx} = F_1^2 - F\Delta F \cos 2\theta_F$  – нормована на масу жорсткість резонатора по осі  $X$ ,  $F\Delta F = (F_1^2 - F_2^2)/2$ , де  $F_1, F_2$  – максимальна та мінімальна резонансні частоти резонатора,  $k_{xy} = -F\Delta F \sin 2\theta_F$  – перехресна жорсткість,  $d_{yx} = d_{xy}$ ,  $d_{yy} = 2/\tau - \Delta(1/\tau)\cos 2\theta_t$  – коефіцієнт демпфування коливань по осі  $Y$ ,  $k_{yx} = k_{xy}$ ,  $k_{yy} = F_2^2 + F\Delta F \cos 2\theta_F$  – нормована на масу жорсткість

резонатора по осі  $Y$ ,  $f_x, f_y$  – нормовані на масу управляючі силові зусилля, що прикладені по осям  $X$  та  $Y$  відповідно.

В рівняннях (3.2) знехтували відцентровими силами і силами, пов'язаними з кутовим прискоренням, але залишили члени, що характеризують похибки, обумовлені різночастотністю  $\Delta F$ , функцією різнодобротності  $\Delta(1/\tau)$  і кутами  $\theta_F$  і  $\theta_\tau$  між головними осями різночастотності, різнодобротності і пучності хвилі, а також перехресними членами  $k_{xy}$  і  $d_{xy}$ . Ці параметри резонатора КВГ визначають якість виготовлення і основні похибки вимірювання кутової швидкості.

У КВГ-ДКШ реалізується зворотний зв'язок, який утримує пружну хвилю в стаціонарному положенні так, що хвиля залишається там, де вона виникла, тобто на осі  $X$  (рис.3.3). Такий режим роботи часто називають режим силового врівноваження хвилі. В КВГ-ДКШ хвиля збуджується на резонансній частоті, її амплітуда стабілізується автоматичним регулюванням посилення (АРП), а резонансна частота відстежується системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). У деяких слабкострумівих варіантах КВГ-ДКШ замість ФАПЧ використовується більш проста система – автогенератор [22]. Обидві ці системи із замкненими негативними зворотними зв'язками (автогенератор – система з позитивним зворотним зв'язком) і замикаються по осі  $X$ .

Вони виробляють силу  $f_x$ , яка підтримує незатухаючі (з постійною, заданою амплітудою) коливання необхідної(резонансної) частоти:

$$x = A_0 \cos F_x t, \quad (3.3)$$

$$\text{де } F_x^2 = F^2 - F \Delta F \cos 2\theta_F.$$

Тоді рівняння для  $y$  запишеться наступним чином:

$$\begin{aligned} \ddot{y} + \frac{2}{\tau_y} \dot{y} + F_y^2 y = \\ = f_y - A_0 F_x \left[ 2k\Omega + \Delta \left( \frac{1}{\tau} \right) \sin 2\theta_\tau \right] \sin F_x t + A_0 F_x \Delta F_x \sin 2\theta_F \cos F_x t, \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{де } \frac{1}{\tau_y} = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{2} \Delta \left( \frac{1}{\tau} \right) \cos 2\theta_\tau, \quad F_y^2 = F^2 + F \Delta F \cos 2\theta_F.$$

Зворотній зв'язок по осі  $Y$  виробляє силу  $f_x$ , яка компенсує коливання по осі  $Y$ , тобто силу, що обнуляє праву частину рівняння (3.4):

$$f_x = A_0 F_x \left[ 2k\Omega + \Delta \left( \frac{1}{\tau} \right) \sin 2\theta_\tau \right] \sin F_x t + A_0 F_x \Delta F_x \sin 2\theta_F \cos F_x t. \quad (3.5)$$

При цьому, вимірювана кутова швидкість  $\Omega$  виходить шляхом демодуляції напруги в контурі негативного зворотного зв'язку опорним сигналом  $\sin F_x t$ . Демодуляція сигналу зворотного зв'язку опорним сигналом  $\cos F_x t$  виділяє квадратурний сигнал, пропорційний різниці частот  $\Delta F$ , яка також компенсується для мінімізації похибки вимірювання.

Амплітудна демодуляції опорним сигналом  $\sin F_x t$  виділяє амплітуду першого доданка виразу (3.5). Кутова швидкість визначається наступним виразом [23]:

$$\Omega = \frac{1}{SF} \cdot \text{demod}\{f_x\}|_{\sin F_x t} + B. \quad (3.6)$$

де  $SF$  – масштабний коефіцієнт КВГ-ДКШ,  $B$  – зміщення нуля КВГ-ДКШ.

$$SF = 2kF_x A_0; \quad B = \frac{1}{2k} \Delta \left( \frac{1}{\tau} \right) \sin 2\theta_\tau. \quad (3.7)$$

Таким чином, масштабний коефіцієнт КВГ-ДКШ прямо пропорційний амплітуді коливань хвилі, по осі  $X$  і її частоті, а зміщення нуля пропорційне різнодобротності  $\Delta \left( \frac{1}{\tau} \right)$  і синусу кута між віссю коливань, тобто віссю  $X$  і головною віссю демпфування (віссю мінімальної добротності).

Із (3.7) слідує: щоб збільшити (або зменшити) МК для конкретного КВГ-ДКШ необхідно збільшувати (або зменшувати) амплітуду збудження. Так як максимальна напруга живлення на практиці завжди обмежена, то встановлення конкретного значення МК автоматично призводить до встановлення відповідного, виходячи з максимальної напруги живлення, діапазону вимірювання кутових швидкостей:  $\pm \Omega_{max} = \pm V_{max} / SF$ .

Так як резонатор ідеальним виготовити неможливо, то завжди  $\Delta \left( \frac{1}{\tau} \right) \neq 0$ . Це означає, що за зміщення нуля відповідає різнодобротність (не різночастотність) і, якщо хвилю виставити по осі мінімальної добротності

( $\theta_\tau = 0$ ), то зміщення нуля дорівнюватиме нулю. Проте, в рамках режиму роботи КВГ-ДКШ це зробити неможливо, так як хвиля, при роботі КВГ в цьому режимі, повинна збуджуватись строго уздовж осі  $X$ , яка збігається з головною віссю демпфування тільки при ідеальному балансуванні резонатора.

Питання про можливість виставки хвилі уздовж головної осі демпфування розглядається в наступному підрозділі при описі диференціального КВГ-ДКШ-Д.

Блок схема системи управління КВГ- ДКШ, розроблена на підставі [24] представлена на рис.3.4.





Відповідно до блок-схеми управління КВГ-ДКШ детально опишемо алгоритми його роботи.

### **Полосовий адаптивний фільтр сигналу пучності ПФ1.**

На вхід ПФ1 надходить сигнал  $x$  з пучності 3-3 резонатора,  $y$  – вихідний сигнал ПФ1.

$$y(i) = K(x(i) - 3x(i-2) + 3x(i-4) - x(i-6)) + a_1y(i-1) - a_2y(i-2) + a_3y(i-3) - a_4y(i-4) + a_5y(i-5) - a_6y(i-6), \quad (3.8)$$

$$\text{де } K = \frac{1-a}{2}; a_1 = \beta(3 + 4\alpha + \alpha^2); a_2 = 1 + 5\alpha + \alpha^2;$$

$$a_3 = \beta(1 + \alpha)(1 + 8\alpha + \alpha^2); a_4 = \alpha[1 + 5\alpha + \alpha^2 + 2\beta^2(1 + \alpha)^2];$$

$$\alpha_5 = 3\beta\alpha^2(1 + \alpha); \alpha_6 = \alpha^3; \alpha = \frac{1 - \sin\left(4\pi\frac{\Delta f_{BW}}{f_s}\right)}{\cos\left(4\pi\frac{\Delta f_{BW}}{f_s}\right)}; \beta = \cos\left(2\pi\frac{F_p}{f_s}\right).$$

$\Delta f_{BW}$  – ширина полоси полосового фільтра в Гц;  $F_p$  – дійсна резонансна частота в Гц, що надходить з частотоміра;  $f$  – частота дискретизації (100000 Гц).

### **Полосовий адаптивний фільтр сигналу вузла ПФ2.**

На вхід ПФ2 надходить сигнал  $x$  з вузла 2-2 резонатора,  $y$  – вихідний сигнал ПФ2. Коефіцієнти ПФ2 ідентичні коефіцієнтам ПФ1.

### **Блок слідкування за резонансною частотою (Блок 1).**

На вхід множника надходить сигнал  $x$  з ПФ1,  $y$  – вихідний сигнал множника:

$$y(i) = \frac{x(i)}{A_0} \cos(2\pi F_p T_0), \quad (3.9)$$

$$\text{де } 2\pi F_p = F_r, \quad T_0 = \frac{1}{f_s} = 10^{-5} \text{с.}$$

Цей сигнал  $x$  надходить до фільтру низьких частот ФНЧ1,  $y$  – вихідний сигнал ФНЧ1 з множенням на 2:

$$y(i) = 2(K(a_1x(i) - a_2x(i-1) + a_3x(i-2)) + b_1y(i-1) + b_2y(i-2)); \quad (3.10)$$

$$\text{де } K = 10^{-3}; a_1 = 0,241359; \quad a_2 = 0,482718; \quad a_3 = 0,241359; \quad b_1 = 1,95578; \quad b_2 = -0,956544.$$

Він надходить до пропорційно-інтегруючого регулятора  $\Pi 1(x)$ ,  $y$  – вихідний сигнал  $\Pi 1$ :

$$y(i) = y(i-1) + \frac{K_{If}T_0 + 2K_{pf}}{2}x(i) - \frac{K_{If}T_0 - 2K_{pf}}{2}x(i-1), \quad (3.11)$$

де  $K_{If}$ ,  $K_{pf}$  – коефіцієнти регулятора, що налаштовуються.

Цей сигнал множиться на коефіцієнт  $2\pi T_0 K_{VCO}$ .

$$y(i) = 2\pi T_0 K_{VCO} x(i), \quad (3.12)$$

де  $K_{VCO} = 10$  та надходить на суматор перед  $\text{mod}_{2\pi}$ ;

$$y(i) = x(i) + 2\pi T_0 F_p + \text{mod}_{2\pi}, \quad (3.13)$$

де  $x$  – вхідний сигнал з суматора,  $y$  – вихідний сигнал блока ділення по модулю

$2\pi(\text{mod}_{2\pi}) \left( y(i) = \left\{ \frac{x(i)}{2\pi} \right\} \right); \{ \cdot \}$  – дробна частина числа.

$$y(i) = y(i) - \text{floor}(y(i)).$$

Надалі відбувається розбивання вихідного сигналу блоку на синусну та косинусну складові:

$$y_1(i) = \sin(x(i)); \quad y_2(i) = \cos(x(i)). \quad (3.14)$$

### **Автогенератор (Блок 2).**

В автогенераторі відбувається зміщення фази сигналу на 90 град (похідна):

$$y(i) = -y(i-1) + \frac{T_0}{2}(x(i) - x(i-1)), \quad (3.15)$$

де  $x$  – вхідний сигнал, що надходить з ПФ1;  $y$  – вихідний сигнал блоку зміщення фази, який надходить на вхід блоку  $\text{sign}$ :

$$\begin{aligned} y(i) &= 1, & \text{якщо } x(i) > 0; \\ y(i) &= -1, & \text{якщо } x(i) < 0; \\ y(i) &= 0, & \text{якщо } x(i) = 0; \end{aligned} \quad (3.16)$$

де  $x$  – вхідний сигнал з блоку зміщення фази;  $y$  – вихідний сигнал блоку  $\text{sign}$ , що надходить на множник  $A_0$  ( $y(i) = A_0 x(i)$ ), а далі – на вузол пучності резонатора (1-1).

### Частотомір.

Частотомір служить для вимірювання дійсної резонансної частоти.

На вхід частотоміра надходить сигнал з ПФ1( $x$ ),  $y$  – вихідний сигнал частотоміра (резонансна частота  $F_p$ ), що передається на вихід КВГ-ДКШ для оцінки та проведення калібрування виробу. Частотомір має наступні характеристики:

$$\begin{aligned} S_{i+1} &= AP_i A^T + GQG^T; \quad K_{i+1} = S_{i+1} H_{i+1} (H_{i+1}^T S_{i+1} H_{i+1} + R)^{-1}; \\ P_{i+1} &= S_{i+1} - S_{i+1} H_i (H_{i+1}^T S_{i+1} H_i + R)^{-1} H_{i+1} S_{i+1}; \\ y_{i+1} &= Ay_i + K_{i+1} [x_{i+1} - \sin(Ay(i))], \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad G = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad H_{i+1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T \cos(y_{1i} + y_{2i}); \quad P_0 = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix};$$

$Q = 1; \quad R = 1; \quad y_{1i} = F_p (\text{при } t = 25^\circ\text{C}); \quad y_{2i} = 0; \quad y_{1i}$  – оцінка частоти.

Сигнал надходить на множник  $2\pi T_0$ , а з нього на суматор блоку слідування за резонансною частотою.

$$y(i) = 2\pi T_0 x(i). \quad (3.18)$$

### Блок стабілізації амплітуди (Блок 3).

Сигнал з ПФ1 ( $x$ ) надходить на множник:

$$y(i) = x(i) \sin(2\pi F_p T_0). \quad (3.19)$$

Вихідний сигнал множника ( $y$ ) надходить на ФНЧ2. Вихідний сигнал ФНЧ2 подвоюється та має відповідні функції:

$$\begin{aligned} y(i) &= 2(K(a_1 x(i) - a_2 x(i-1) + a_3 x(i-2)) + b_1 y(i-1) + \\ &\quad + b_2 y(i-2)), \end{aligned} \quad (3.20)$$

де  $K = 10^{-3}; a_1 = 0,241359; a_2 = 0,482718; a_3 = 0,241359; b_1 = 1,955578;$

$$b_2 = -0,956544.$$

Потім через суматор ( $y(i) = x(i) - A_0$ ) сигнал надходить до ПІ2. Вихідний сигнал ПІ2 має наступну функцію:

$$y(i) = y(i-1) + \frac{K_{Ia} T_0 + 2K_{pa}}{2} x(i) - \frac{K_{Ia} T_0 - 2K_{pa}}{2} x(i-1), \quad (3.21)$$

де  $K_{Ia}, K_{pa}$  – коефіцієнти регулятора, що налаштовуються.

Сигнал передається на вихід КВГ-ДКШ для оцінки та проведення калібрування виробу. З множника сигнал  $y(i) = x(i) \cos(2\pi i f_r T_0)$  подається на електроди збудження резонатора (1-1).

#### **Блок компенсації сили Коріоліса (Блок 4).**

Сигнал з ПФ2 ( $x$ ) надходить на множник:

$$y(i) = x(i) \sin(2\pi f_r T_0). \quad (3.22)$$

Вихідний сигнал множника ( $y$ ) надходить на ФНЧ3. Вихідний сигнал ФНЧ3 подвоюється та має відповідні функції:

$$y(i) = 2 \left( K(a_1 x(i) - a_2 x(i-1) + a_3 x(i-2)) + b_1 y(i-1) + b_2 y(i-2) \right), \quad (3.23)$$

де  $K = 10^{-3}$ ;  $a_1 = 0,241359$ ;  $a_2 = 0,482718$ ;  $a_3 = 0,241359$ ;  $b_1 = 1,955578$ ;  $b_2 = -0,956544$ .

З виходу ФНЧ3 сигнал надходить на ПІЗ, що має відповідні функції:

$$y(i) = y(i-1) + \frac{K_{Ic} T_0 + 2K_{pc}}{2} x(i) - \frac{K_{Ic} T_0 - 2K_{pc}}{2} x(i-1), \quad (3.24)$$

де  $K_{Ic}$ ,  $K_{pc}$  – коефіцієнти регулятора, що налаштовуються.

Вихід ПІЗ є значенням кутової швидкості, що передається на вихід КВГ-ДКШ.

З множника сигнал  $y(i) = x(i) \cos(2\pi i F_p T_0)$  подається на суматор системи компенсації.

#### **Блок компенсації квадратури (Блок 5).**

Сигнал з ПФ2 ( $x$ ) надходить на множник:

$$y(i) = x(i) \cos(2\pi i F_p T_0). \quad (3.25)$$

Вихідний сигнал множника ( $y$ ) надходить на ФНЧ4. Вихідний сигнал ФНЧ4 подвоюється та має відповідні функції:

$$y(i) = 2 \left( K(a_1 x(i) - a_2 x(i-1) + a_3 x(i-2)) + b_1 y(i-1) + b_2 y(i-2) \right), \quad (3.26)$$

де  $K = 10^{-3}$ ;  $a_1 = 0,241359$ ;  $a_2 = 0,482718$ ;  $a_3 = 0,241359$ ;  $b_1 = 1,955578$ ;  
 $b_2 = -0,956544$ .

З виходу ФНЧЗ сигнал надходить на ПП4, що має відповідні функції:

$$y(i) = y(i-1) + \frac{K_{Iq}T_0 + 2K_{pq}}{2}x(i) - \frac{K_{Iq}T_0 - 2K_{pq}}{2}x(i-1), \quad (3.27)$$

де  $K_{Iq}$ ,  $K_{pq}$  – коефіцієнти регулятора, що налаштовуються.

Сигнал передається на вихід КВГ-ДКШ для оцінки та проведення калібрування виробу.

З множника сигнал  $y(i) = x(i) \sin(2\pi F_p T_0)$  подається на суматор системи компенсації.

#### **Суматор системи компенсації.**

Вихідні сигнали блоків компенсації сили Коріоліса ( $x_1$ ) та компенсації квадратури ( $x_2$ ) сумуються та подаються на компенсаційні електроди резонатора (4-4):

$$y(i) = x_1(i) + x_2(i) \quad (3.28)$$

Результати моделювання, отриманні при дослідженні дослідного зразка представлені в наступному розділі.

### **3.2.2. Диференціальний режим вимірювання кутової швидкості (КВГ-ДКШ-Д)**

Точність КВГ в основному залежить від добротності матеріалу і якості виготовлення його резонатора. Головні параметри, що характеризують якість резонатора КВГ це різнодобротність і різночастотність, які є функціями різної товщини його робочої (вібуючої) частини і неоднорідності матеріалу.

Ці параметри зводяться до мінімуму в процесі механічного балансування мас резонатора. Процедура механічного балансування є технологічно неефективною і призводить до зростання вартості КВГ. Для збільшення технологічності і точності балансування були розроблені методи електричного балансування, які без попереднього механічного балансування можуть застосовуватися в основному для мікромеханічних резонаторів [25]. Крім того,

по-різному добротність і різночастотних змінюються від температури та часу, що призводить до деградації якості резонаторів і точності КВГ в процесі їх експлуатації.

Існує велика кількість методів по адаптивному управлінню хвилею КВГ [26], де пропонується ідентифікувати і компенсувати неідеальності резонатора в реальному масштабі часу, при цьому кутова швидкість оцінюється, як один з параметрів, адаптивним спостерігачем. В цьому випадку суттєво зростає навантаження на процесор і обмежується частота видачі інформації про кутову швидкість, а також діють обмеження на використанні моделі похибок, їх адекватності реальним похибкам, швидкості адаптації алгоритмів до мінливих умов навколишнього середовища і, відповідно, моделям похибок.

Компенсація похибок вимірювання кутової швидкості забезпечується за рахунок застосування диференціального методу вимірювання кутової швидкості шляхом алгоритмічної реалізації двох осей чутливості в одному резонаторі КВГ, кут між якими дорівнює 180 град [27–29]. Диференційний метод вимірювання кутової швидкості обертання за допомогою КВГ назовемо КВГ-ДКШ-Д.

Припустимо, що при подачі сигналів управління  $f_x$  і  $f_y$  на електроди  $X$  і  $Y$  стояча вібраційна хвиля розташовується між електродами. При цьому, сигнали управління представимо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} f_x &= (K_x \dot{x} + K_f^x x) D_x G_x; \\ f_y &= (K_y \dot{y} + K_f^y y) D_y G_y; \end{aligned} \quad (3.29)$$

де  $K_x, K_y$  – компоненти сигналу управління по осях  $X$  і  $Y$ , що впливають на демпфування;  $K_f^x, K_f^y$  – компоненти сигналу управління по осях  $X$  і  $Y$ , що впливають на жорсткість;  $G_x, G_y$  – коефіцієнти перетворення електричної напруги, поданої на електроди по осях  $X$  і  $Y$ , в силу;  $D_x, D_y$  – коефіцієнти перетворення електродами механічної деформації в електричну напругу по осях  $X$  і  $Y$ , відповідно.

У цьому випадку рівняння (3.2) можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + k_{xx}x + k_{xy}y &= (2k\Omega - d_{xy})\dot{y} + (K_x\dot{x} + K_f^x x)D_x G_x; \\ \ddot{y} + d_{yy}\dot{y} + k_{xy}x + k_{yy}y &= (-2k\Omega - d_{xy})\dot{x} + (K_y\dot{y} + K_f^y y)D_y G_y.\end{aligned}\quad (3.30)$$

Групуючи члени, відповідальні за частоту коливань в лівій частині цих рівнянь, отримаємо:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + k_{xx}x + k_{xy}y - K_f^x x D_x G_x &= (2k\Omega - d_{xy})\dot{y} + K_x\dot{x} D_x G_x; \\ \ddot{y} + d_{yy}\dot{y} + k_{yy}y + k_{xy}x - K_f^y y D_y G_y &= (-2k\Omega - d_{xy})\dot{x} + K_y\dot{y} D_y G_y.\end{aligned}\quad (3.31)$$

Три останніх доданки в лівих частинах цих рівнянь відповідальні за частоти коливань по осях  $X$  і  $Y$ , відповідно.

Формуємо сигнали  $K_f^x$  та  $K_f^y$  так, щоб частоти коливань по обох осях були рівні  $F_r$ , тобто виконувалася умова:

$$k_{xx}x + k_{xy}y - K_f^x x D_x G_x = k_{yy}y + k_{xy}x - K_f^y y D_y G_y = F_r^2. \quad (3.32)$$

Це може бути досягнуто, якщо різниця повних фаз коливань сигналів  $x(t)$  і  $y(t)$  не змінюється, тобто  $phase\{x(t)\} - phase\{y(t)\} = const$ , а також має виконуватися співвідношення  $\dot{x}y - \dot{y}x = 0$ . Утримання зазначеного співвідношення, наприклад, за допомогою пропорційно-інтегруючого (ПІ) регулятора призводить до вирівнювання частот коливань по осях  $X$  і  $Y$ .

При виконанні умови (3.32) рівняння (3.31) приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + F_r^2 x &= (2k\Omega - d_{xy})\dot{y} + K_x\dot{x} D_x G_x; \\ \ddot{y} + d_{yy}\dot{y} + F_r^2 y &= (-2k\Omega - d_{xy})\dot{x} + K_y\dot{y} D_y G_y.\end{aligned}\quad (3.33)$$

Шукаємо стаціонарне рішення цих рівнянь у вигляді:

$$\begin{aligned}x &= r \cos 2\theta \sin(F_r t); \\ y &= r \sin 2\theta \sin(F_r t + \varphi).\end{aligned}\quad (3.34)$$

де  $\varphi$  – постійна різниця фаз між сигналами електродів  $X$  і  $Y$ ,  $r$  – амплітуда стоячої хвилі,  $\theta$  – кут між віссю  $X$  і напрямком коливань хвилі,  $F_r$  – резонансна частота стоячої хвилі, однакова для обох напрямків коливань.

Підставляючи (3.34) в (3.33) отримаємо:

$$\begin{aligned}[d_{xx} \cos 2\theta - (2k\Omega - d_{xy}) \sin 2\theta \cos \varphi - K_x G_x D_x \cos 2\theta] \cos F_r t \\ = [(2k\Omega - d_{xy}) \sin 2\theta \sin \varphi] \sin F_r t;\end{aligned}\quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} & [d_{yy}\sin 2\theta + (2k\Omega + d_{xy})\cos 2\theta \cos \varphi - K_y G_y D_y \sin 2\theta \cos \varphi] \cos F_r t \\ & = [d_{yy}\sin 2\theta \sin \varphi - K_y G_y D_y \sin 2\theta \sin \varphi] \sin F_r t. \end{aligned}$$

Праві і ліві частини цих рівнянь можуть бути рівні для будь-якого  $t$  тільки і тільки тоді, коли амплітуди при відповідних синусах і косинусах дорівнюють нулю. Звідси випливають наступні чотири рівності для «повільних» змінних, тобто змінних, отриманих після демодуляції сигналів двома опорними сигналами  $\sin F_r t$  і  $\cos F_r t$ :

$$\begin{aligned} X_c &= D_x d_{xx} \cos 2\theta - (2k\Omega - d_{xy}) D_y \sin 2\theta \cos \varphi - K_x D_x G_x \cos 2\theta = 0; \\ X_s &= (2k\Omega - d_{xy}) D_y \sin 2\theta \sin \varphi = 0; \\ Y_c &= D_y d_{yy} \sin 2\theta + (2k\Omega + d_{xy}) D_x \cos 2\theta \cos \varphi - K_y D_y G_y \sin 2\theta \cos \varphi = 0; \\ Y_s &= D_y d_{yy} \sin 2\theta \sin \varphi - K_y D_y G_y \sin 2\theta \sin \varphi = 0. \end{aligned} \quad (3.36)$$

З цих рівнянь випливає, що якщо утримувати (системою управління) різницю фаз  $\varphi = 0$ , то коефіцієнт при вимірюваній кутовій швидкості  $\Omega$  буде максимальним ( $\cos \varphi = 1$ ). В іншому випадку ( $\varphi = \pi/2$ ), тільки сигнал  $X_s$  несе інформацію про вимірювану кутову швидкість обертання  $\Omega$  і, для максимізації масштабного коефіцієнта слід покласти  $\theta = \pi/4$ , тобто утримувати хвилю на осі  $Y$ . Останнє еквівалентно традиційному алгоритму КВГ-ДКШ.

Вважаючи в рівняннях (3.36)  $\varphi = 0$ , друге і четверте рівняння перетворюються в тотожності. Розділивши обидві частини першого рівняння на  $\cos 2\theta$ , а другого на  $\sin 2\theta$  і вважаючи, що  $\theta \neq 0, \pi/4$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} -2k\Omega D_y \tan 2\theta + d_{xy} D_y \tan 2\theta + D_x d_{xx} &= K_x G_x D_x; \\ 2k\Omega D_x \cotan 2\theta + d_{xy} D_x \cotan 2\theta + D_y d_{yy} &= K_y G_y D_y, \end{aligned} \quad (3.37)$$

де  $d_{xx} = \left(\frac{2}{\tau} + h \cos(2(\theta - \theta_\tau))\right); \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = h = \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}; \frac{2}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2};$

$$d_{yy} = \left(\frac{2}{\tau} - h \cos(2(\theta - \theta_\tau))\right); \quad d_{xy} = h \sin(2(\theta - \theta_\tau)),$$

$\tau_1, \tau_2$  – мінімальна і максимальна постійні часу загасання вільних коливань резонатора;  $\theta_\tau$  – кут між віссю  $X$  і віссю мінімального загасання;  $\theta$  – кут між віссю  $X$  і пучністю стоячої пружної хвилі.



Ці рівняння показують, що коливання по осях  $X$  і  $Y$  чутливі до кутової швидкості обертання, при чому знаки кутової швидкості протилежні. Віднімаючи перше рівняння (3.37) із другого, а також сумуючи їх, отримаємо:

$$\begin{aligned} 2k\Omega(D_x \operatorname{ctg} 2\theta + D_y \operatorname{tg} 2\theta) + d_{xy}(D_x \operatorname{ctg} 2\theta - D_y \operatorname{tg} 2\theta) + D_y d_{yy} - \\ - D_x d_{xx} = K_y G_y D_y - K_x G_x D_x; \\ 2k\Omega(D_x \operatorname{ctg} 2\theta - D_y \operatorname{tg} 2\theta) + d_{xy}(D_x \operatorname{ctg} 2\theta + D_y \operatorname{tg} 2\theta) + D_y d_{yy} \\ - D_x d_{xx} = K_y G_y D_y + K_x G_x D_x. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Для ефективної реалізації диференціального режиму необхідно встановити хвилю під кутом  $\theta$ , при якому виконується така умова:

$$D_x = D_y \tan^2 2\theta \rightarrow \theta = \frac{1}{2} \arctan \sqrt{\frac{D_x}{D_y}}. \quad (3.39)$$

В цьому випадку рівняння (3.38) запишуться в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} 4k\sqrt{D_x D_y} \Omega + D_y d_{yy} - D_x d_{xx} = K_y G_y D_y - K_x G_x D_x; \\ 2d_{xy}\sqrt{D_x D_y} + D_y d_{yy} + D_x d_{xx} = K_y G_y D_y + K_x G_x D_x. \end{aligned} \quad (3.40)$$

В правій частині цих рівнянь стоять вимірювальні величини. З лівої частини першого рівняння видно, що масштабний коефіцієнт КВГ-ДКШ-Д дорівнює:

$$SF = 4k\sqrt{D_x D_y}, \quad (3.41)$$

а зміщення нуля дорівнює:

$$B = D_y d_{yy} - D_x d_{xx}. \quad (3.42)$$

Як видно з співвідношень, КВГ-ДКШ-Д не залежить від резонансної частоти і від амплітуди коливань, але залежність від коефіцієнтів електродів  $D_x$ ,  $D_y$  зберігається. У зміщенні нуля  $B$  відсутнє перехресне демпфування  $d_{xy}$ .

Важливим фактом є те, що друге рівняння (3.40) не містить вимірюваної кутової швидкості, але містить похибки вимірювання кутової швидкості. Цей факт може забезпечити можливість корекції (або калібрування) похибок в процесі вимірювання кутової швидкості, тобто при русі об'єкту.

Замінімо параметри  $d_{xy}$ ,  $d_{xx}$  і  $d_{yy}$  їх виразами, прийнятими в виразі (3.37) і перепишемо (3.40) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 4k\sqrt{D_x D_y}\Omega + \frac{2}{\tau}(D_y - D_x) + (D_y + D_x)\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\cos 2(\theta - \theta_\tau) = \\
 = K_y G_y D_y - K_x G_x D_x; \\
 2\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2(\theta - \theta_\tau)\sqrt{D_x D_y} + \frac{2}{\tau}(D_y + D_x) \\
 + (D_y - D_x)\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2(\theta - \theta_\tau) = K_y G_y D_y + K_x G_x D_x.
 \end{aligned}
 \tag{3.43}$$

Слід зазначити, що коефіцієнти перетворення електродів  $D_x$  і  $D_y$ , як правило, невідомі з необхідною точністю. Наприклад, якщо в якості електродів використовуються п'єзокерамічні пластини, то виробник вказує номінальне значення коефіцієнта  $D$ , яке може відрізнятися від реального на 10%, що є неприйнятним для точних КВГ. Тому задовольнити умову (3.39) з необхідною точністю буде неможливо. Крім того, параметр  $D$  залежить від температури, також як і  $\tau$ ,  $d_{xy}$ ,  $d_{yy}$ ,  $d_{xx}$ ,  $\theta_\tau$ .

Тому, повертаючись до рівнянь (3.37) визначимо як невідомі наступні параметри:  $\tau$ ,  $d_{xy}$ ,  $d_{yy}$ ,  $d_{xx}$ ,  $\theta_\tau$ ,  $D_x$ ,  $D_y$  і  $k$ . Коефіцієнт Брайана  $k$  являється константою, практично незалежною від температури, однак, для конкретного резонатора, його значення з необхідною точністю невідомо. При калібруванні перерахованих параметрів в заводських умовах,  $\Omega$  є не що інше, як вертикальна складова кутової швидкості обертання Землі і, як правило, відома з необхідною точністю. Таким чином, для визначення перерахованих вище параметрів необхідно мати не менше 7-ми рівнянь. Це можна реалізувати, проводячи вимірювання вихідних сигналів по двом каналам (рівнянням) в чотирьох різних положеннях хвилі  $\theta_1 \dots \theta_4$ . В результаті отримуємо 8 рівнянь, з яких визначаються 7 вищевказаних невідомих. Визначивши коефіцієнти  $D_x$  і  $D_y$ , в процесі калібрування з необхідною точністю, хвиля може бути виставлена так, щоб задовольнити умову (3.39). У процесі калібрування визначається також зміщення нуля і масштабний коефіцієнт. Безумовно, калібрувати таким способом не доцільно тому, що через мале значення кутової швидкості

обертання Землі, точність виходить незадовільною. МКслід визначати традиційним способом, використовуючи високоточні обертаючі стенди з термокамерами.

Один з варіантів блок-схеми системи управління КВГ-ДКШ-Д, побудованої на основі [30] з автогенератором представлена на рис.3.5.

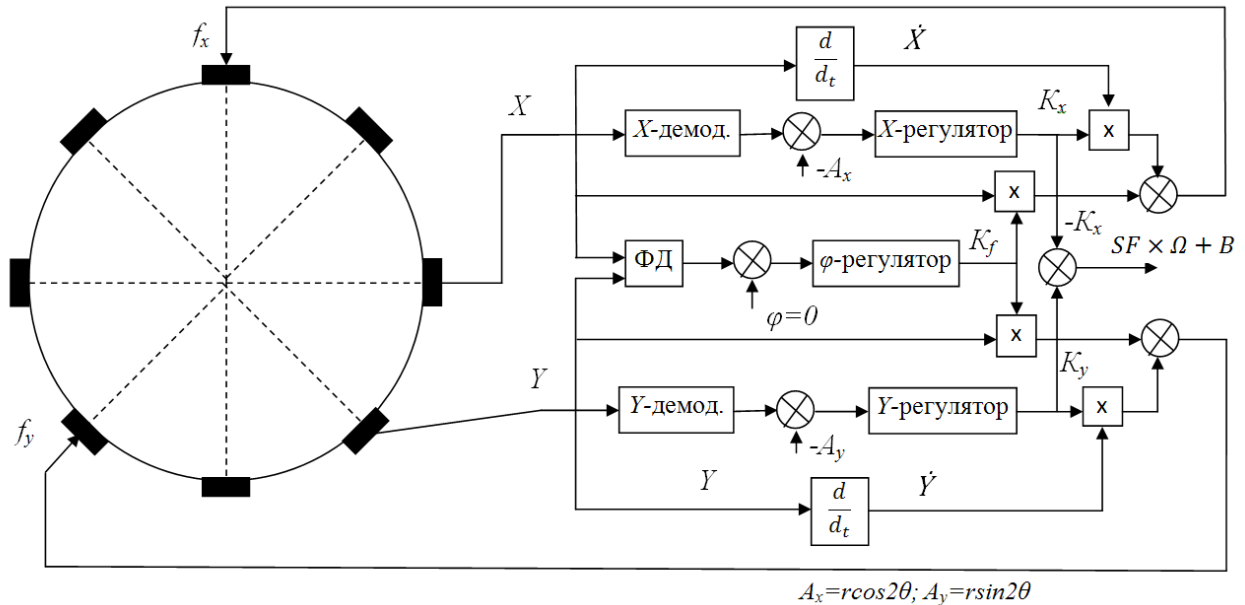


Рис.3.5. Блок-схема системи управління КВГ-ДКШ-Д

Амплітуда вібраційної хвилі визначається як  $r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ . В якості регуляторів можуть бути використані пропорційно-інтегруючі (ПІ) регулятори. Управляючий сигнал  $K_f$  для  $X$  і  $Y$  каналів один і той же. В цій блок-схемі використовується спрощена система збудження, основана на автогенераторі. Для високоточних гіроскопів замість автогенератора слід використовувати ФАПЧ. Вимірювання різночастотності коливань резонатора по осям  $X$  і  $Y$  при роботі КВГ-ДКШ-Д в температурному діапазоні мінус 40 ... + 50°С за зміною температури з часом представлені на рис.3.6.

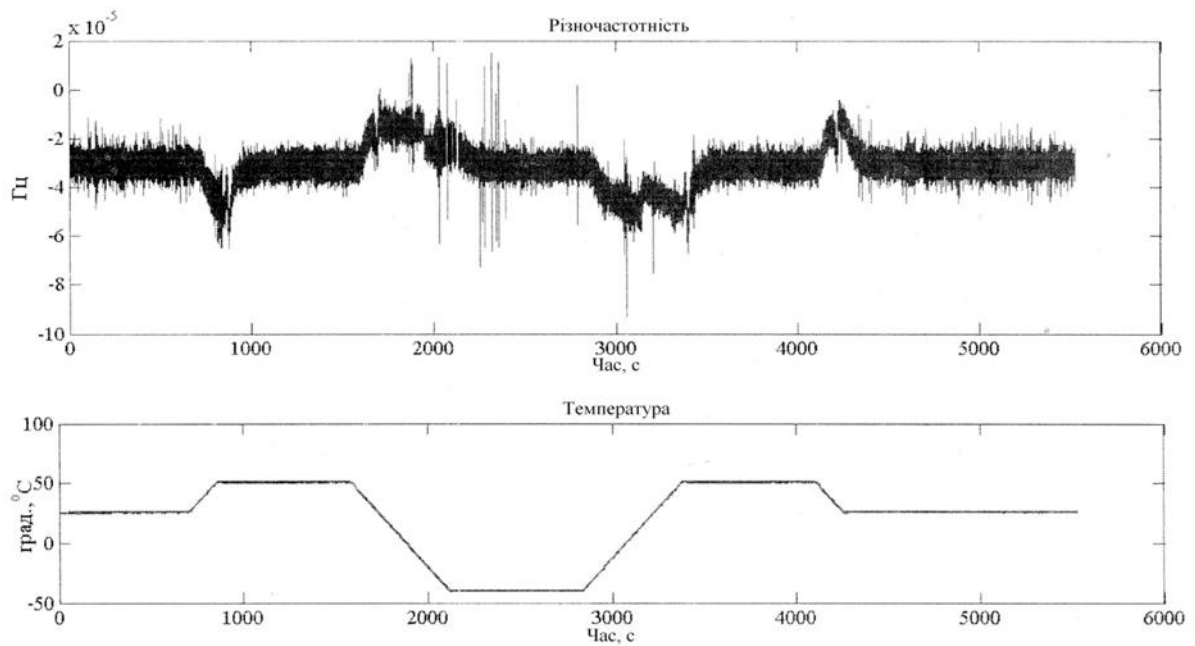


Рис.3.6. Залежність різночастотності від часу при зміні температури КВГ-ДКШ-Д

Як видно з рис.3.6 система управління утримує частоти коливань рівними з точністю  $6 \times 10^{-5}$  Гц в температурному діапазоні, включаючи і градієнти температур, що створюються швидкістю її зміни  $1^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ .

На рис.3.7 представлений перехідний процес при вирівнюванні частоти каналів  $X$  та  $Y$ . Довжина перехідного процесу складає біля 40с, що пояснюється налаштуванням коефіцієнтів регулятора на достатньо низьку полосу пропускання.

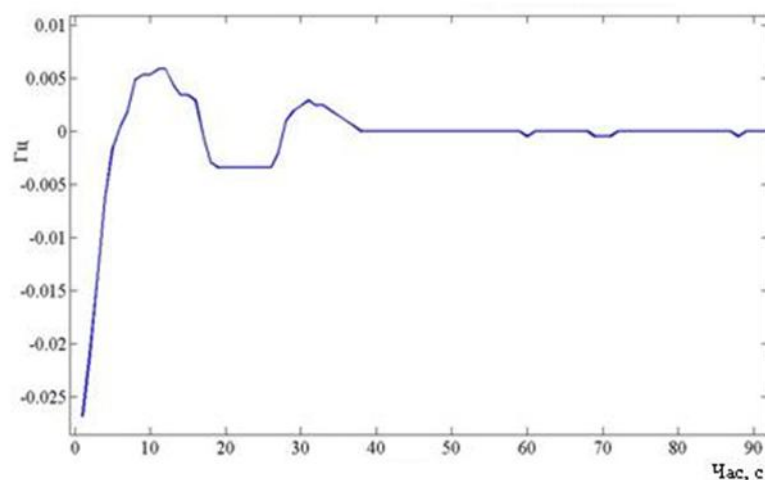


Рис.3.7. Перехідний процес вирівнювання частот в КВГ-ДКШ-Д

На рис.3.8представлені вихідні сигнали КВГ-ДКШ-Д, встановленого на платформі без демпфера, при слабому ударі (до 5 g) вздовж осі чутливості.

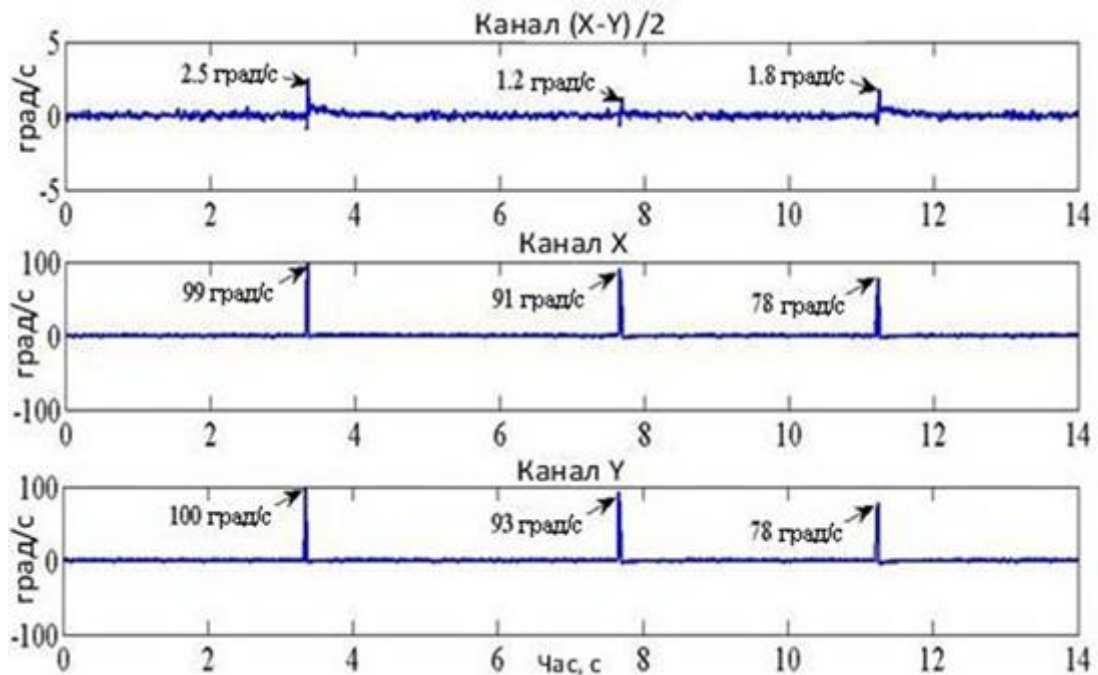


Рис.3.8. Вихідні сигнали КВГ-ДКШ-Д при ударах 5g

Як видно із рис.3.8 коефіцієнт придушення каналу  $(X - Y)/2$ , оцінюється по відношенню пікових значень відгуків і складає мінімум  $99/2,5 \approx 39$  раз.

На рис.3.9 представлені три вихідні сигнали КВГ-ДКШ-Д без демпфера при ударі амплітудою 20g довжиною 2 мс вздовж його осі чутливості.

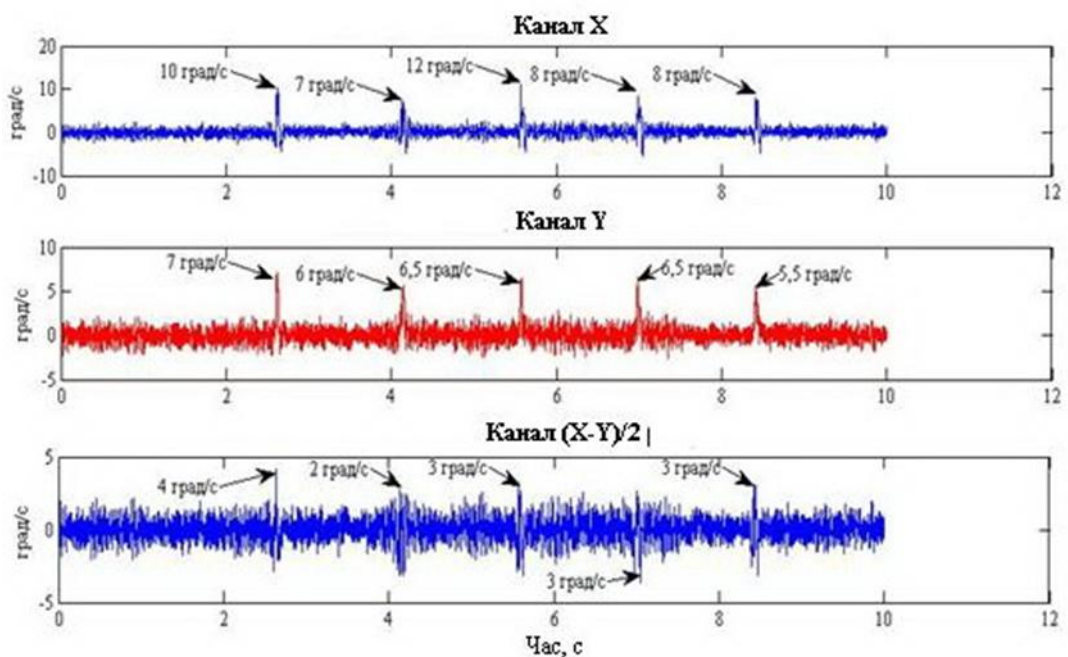


Рис.3.9. Вихідні сигнали КВГ-ДКШ-Д при ударі 20g, 2мс

За графіком, представленим на рис.3.9 видно, що пікові значення відгуку на удар для диференціального каналу приблизно в 2 рази менше, ніж пікові значення відгуку каналів  $X$  і  $Y$ .

На рис.3.10 представлені графіки кутів, накопичених по каналах  $X$ ,  $Y$  і  $(X - Y)/2$ .

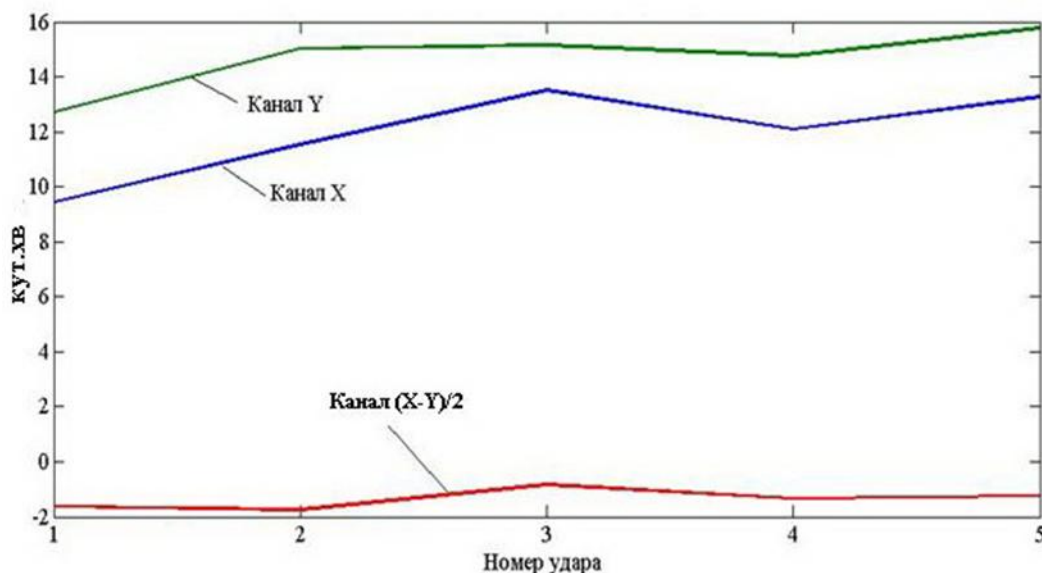


Рис.3.10. Похибка вимірювання кута під час удару 20g, 2 мс

Істотна різниця в накопичених кутах, приблизно в 6 разів, щодо диференціального каналу очевидна. При цьому, похибка кута, накопиченого диференціальним каналом, не перевищує 2 кут.хв.

На рис.3.11 представлений відгук каналів КВГ-ДКШ-Д на один із ударів 100g, 2мс перпендикулярно його осі чутливості.

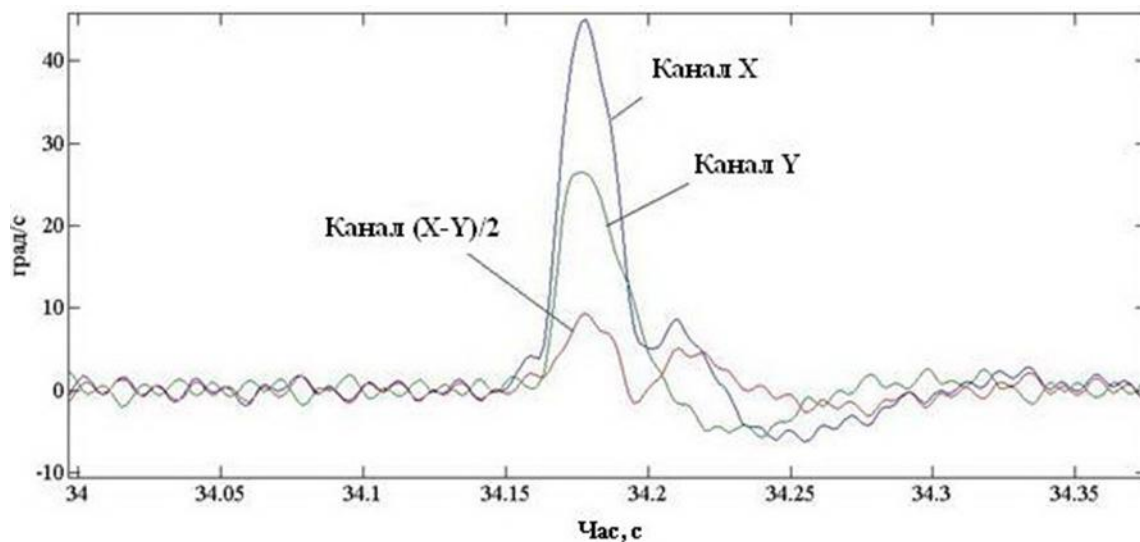


Рис.3.11. Відгук каналів КВГ-ДКШ-Д на удар 100g, 2мс

Як видно з цього графіка, пікове значення відгуку диференціального каналу приблизно в 2,5 рази менше, ніж у меншого з двох інших каналів. Крім того, відсутнє насичення у всіх каналів, а пікове значення у найбільшого з них (каналу X) не більше 45 град/с.

### 3.2.3. Інтегруючий режим роботи КВГ (КВГ-I)

У інтегруючому режимі роботи КВГ (КВГ-I) сила Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання вібраційної структури, не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. На будь-якому часовому інтервалі кут повороту хвилі пропорційний куту повороту резонатора, а разом з ним і всього гіроскопа, відносно інерційного простору.

При відсутності зовнішніх сил  $f_x = f_y = 0$  і демпфування  $d_{xx} = d_{yy} = d_{yx} = 0$ , рівняння (3.2) має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} y &= a \sin \left( \theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin * \\ &\quad * \left( \theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'); \\ x &= a \cos \left( \theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin * \\ &\quad * \left( \theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'). \end{aligned} \quad (3.44)$$

Рівняння (3.44) показують, що під час відсутності зовнішніх сил і демпфування, траєкторія руху матеріальної точки резонатора в процесі коливань обертається при обертанні резонатора з кутовою швидкістю  $\Omega$  з відставанням по куту на коефіцієнт Брайана. Коефіцієнт Брайана для циліндра можна визначити точніше за формулою[31]:

$$k = \frac{n}{n^2 + 1 + \frac{3}{n^2} \left( \frac{r}{h} \right)^2}, \quad (3.45)$$

де  $n$  – номер моди коливань,  $n = 2$ ,  $r$  – радіус циліндра,  $h$  – висота циліндра.

Для циліндра діаметром 25 мм та висотою  $h = 18$  мм:  $k = 0,373$ .

### 3.2.3.1. Структурная схема інтегруючого КВГ-I

При відсутності кутової швидкості  $\Omega$  траєкторія руху матеріальної точки є еліпс. При обертанні гіроскопа з кутовою швидкістю  $\Omega$  еліпс повертається в бік обертання. Якщо гіроскоп повернувся, наприклад, на 90 град, то хвиля (велика вісь еліпса) повернеться на кут  $\theta = k \cdot 90^\circ = 0,373 \cdot 90^\circ = 33,57$  град. Графік траєкторії точки в процесі коливань резонатора представлена на рис.3.12.

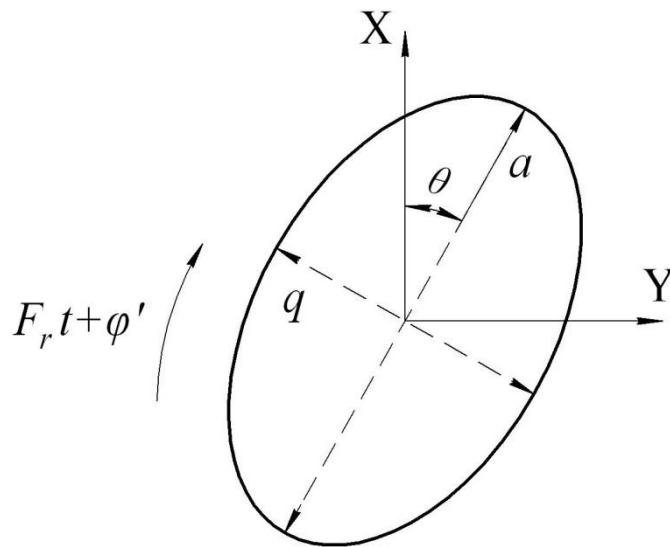


Рис.3.12. Траєкторія точки в процесі коливань

При відсутності зовнішніх сил та демпфування і коли частоти двох хвиль однакові – параметри  $a$ ,  $q$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  є константами, а КВГ є ідеальним гіроскопом. Різниця власних частот коливань, демпфування, зовнішні сили призводять до того, що параметри  $a$ ,  $q$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  змінюються з часом. Ця зміна в часі відбувається значно повільніше, ніж період швидких коливань  $T = 2\pi/F$ .

Для керування хвилею КВГ повинні бути прикладені сили, які змінюються з частотами близькими або рівними резонансній частоті і мають відповідну фазу. Для цього потрібний генератор опорної фази. Генератор опорної фази виробляє сигнали, що забезпечують прикладання сил необхідної частоти і фази, а також опорні сигнали для модуляції та демодуляції. Саме по демодульованим вихідним сигналам обчислюються оцінки параметрів  $a$ ,  $q$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ .



Для того, щоб отримати прийнятну точність вимірювання кутової швидкості або кута повороту, у всіх КВГ незалежно від режимів його роботи необхідний контур керування амплітудою.

У КВГ більш високої точності необхідно компенсувати величину  $q$  – квадратуру, зводячи її до нуля. Цей сигнал називається квадратурою, так як його фаза відрізняється від фази основного сигналу, пропорційного кутовій швидкості, на 90 град.

Параметри  $a, q, \theta, \varphi$  можна визначити через демодуляційні змінні  $C_x, S_x, C_y, S_y$ . Співвідношення, що пов'язують демодуляційні змінні з параметрами траєкторії, визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{1}{2}(E + \sqrt{E^2 - Q^2})}; & q &= \sqrt{\frac{1}{2}(E - \sqrt{E^2 - Q^2})}; \\ E &= C_x^2 + S_x^2 + C_y^2 + S_y^2; & Q &= 2(C_x S_y - C_y S_x); \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctan \frac{2(C_x C_y + S_x S_y)}{C_x^2 + S_x^2 - C_y^2 - S_y^2}; & \varphi &= \frac{1}{2} \arctan \frac{C_x S_x + C_y S_y}{C_x^2 - S_x^2 + C_y^2 - S_y^2}. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Мета системи керування КВГ, що працює в інтегруючому режимі, полягає в забезпеченні наступних значень параметрів  $a, q, \theta_0, \varphi$  в процесі роботи гіроскопа:

$$q = 0 \ (Q = 0), a^2 = E = const, \varphi = 0. \quad (3.47)$$

Структурна схема системи керування КВГ-I представлена на рис.3.13 [30].

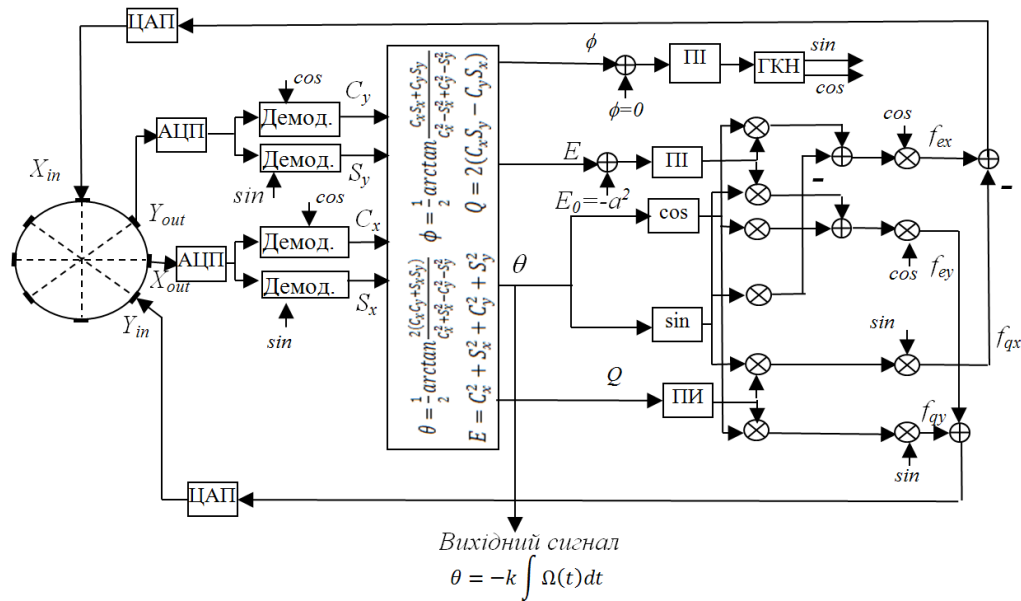


Рис.3.13. Структурна схема системи керування КВГ-I

### 3.2.3.2. Simulink-модель інтегруючого КВГ-I

На основі структурної схеми, представленій на рис.3.13, а також використовуючи Simulink-модель КВГ-ДКШ, побудована Matlab-Simulink модель КВГ-I, яка представлена на рис.3.14.

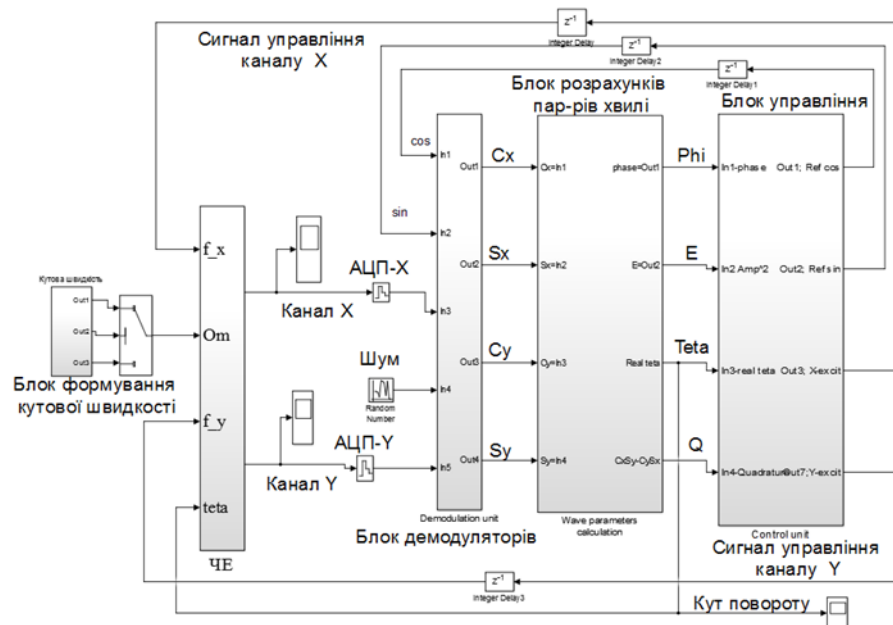


Рис.3.14. Matlab-Simulink модель КВГ-I

Модель складається з 5-ти блоків:

Блок формування кутової швидкості, що забезпечує перемикання з нульової або постійної кутової швидкості на змінну кутову швидкість. При

нульовій кутовій швидкості на вході моделі спостерігається сигнал зміщення нуля.

З блоку формування кутової швидкості сигнал надходить на вхід  $O_m$  чутливого елемента (ЧЕ), два виходи якого формують вимірювальні канали  $X$  та  $Y$  відповідно до вирішень рівнянь (3.1). У модель блоку ЧЕ, також вводяться такі параметри резонатора як резонансна частота, добротність, різночастотність, різнодобротність, кути  $\theta_\tau$  і  $\theta_F$ . З двох виходів ЧЕ сигнали надходять на АЦП вимірювальних каналів  $X$  та  $Y$  і далі в цифровій формі надходять на блок демодуляторів.

Блок демодуляторів працює відповідно до структурної схеми, представленої на рис.3.14, тобто за допомогою опорних сигналу  $\sin F_r t$  і  $\cos F_r t$  резонансної частоти  $F_r$  проводиться операція амплітудної демодуляції і формуються демодульовані змінні  $C_x$ ,  $S_x$ ,  $C_y$ ,  $S_y$ , які надходять на блок обчислення параметрів хвилі.

Блок обчислення параметрів хвилі обчислює параметри  $a, q(Q), \theta, \varphi$  та подає їх в блок керування.

Блок керування формує керуючі сигнали на електроди ЧЕ так, як показано на рис.3.13.

Кут хвилі  $\theta$  пропорційний куту повороту гіроскопа і являє собою вихідний сигнал КВГ-I. Цей сигнал формується на виході блоку обчислення параметрів хвилі і надходить на вихід гіроскопа, а також подається в блок керування для перерахунку керуючих сигналів  $f_x$  та  $f_y$  відповідно до зміненої орієнтацією хвилі щодо електродів керування хвилею.

Відмінність моделей КВГ, що реалізують різні режими роботи, складається саме в побудові блоку керування хвилею.

Simulink-схема блоку керування хвилею КВГ-I представлена на рис.3.15.

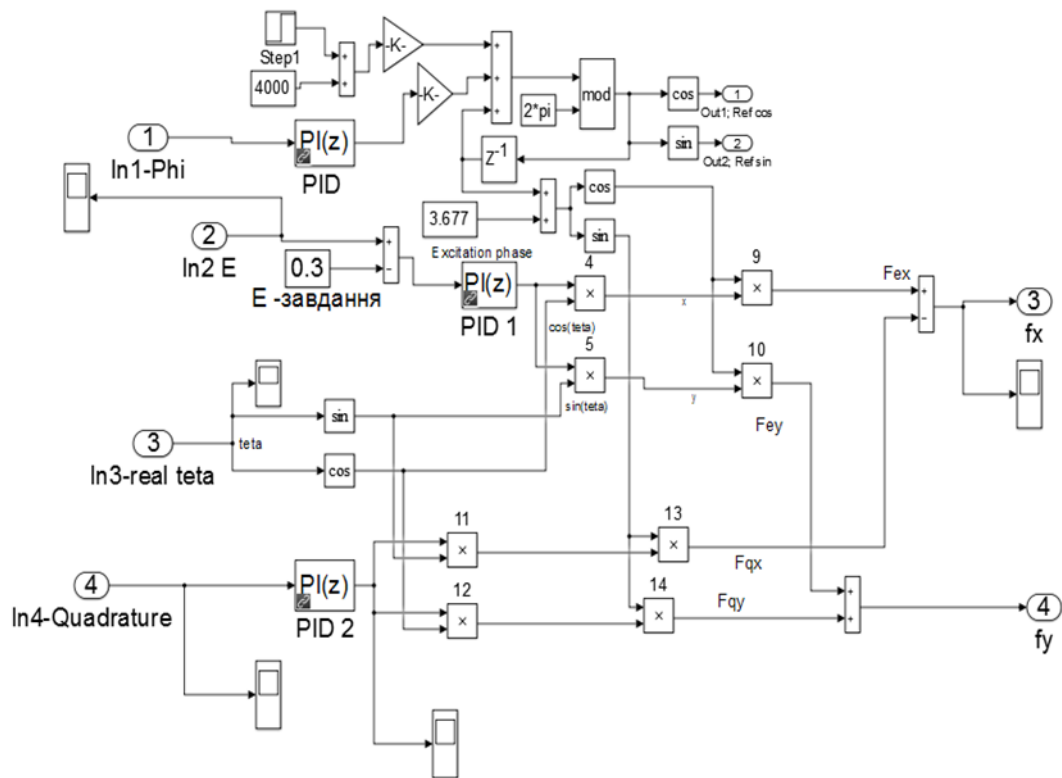


Рис.3.15. Simulink-схема блоку керування хвилею КВГ-I

У цій блок-схемі, на відміну від блок-схем КВГ-ДКШ-Д і режиму КВГ-ДКШ, використовуються 3 ПІД (пропорційний-інтегруючий-диференціюючий) регулятора для забезпечення бажаних значень параметрів хвилі  $\varphi$ ,  $E$ , та  $Q$  зазначених у виразах (3.47). Блок керування також формує опорні сигнали для модуляції сигналів керування і демодуляції вимірних сигналів.

### 3.2.3.3. Результати моделювання КВГ-I

При ідеальному кільцевому резонаторі, коли різночастотність дорівнює нулю, і, отже, квадратура  $q = Q = 0$ , траєкторія руху матеріальної точки на ободі резонатора в процесі коливань резонатора є прямою лінією, що збігається з радіусом кільця. Орієнтація цієї траєкторії, залишаючись прямою лінією, змінюється, обертаючись навколо центру кільця. У реальному резонаторі, при наявності різночастотності, сигнал квадратури  $Q \neq 0$  і траєкторія точки на резонаторі є еліпсом. Ці траєкторії в координатах  $X$  та  $Y$  при  $Q = 0$  і  $Q \gg 0$  показані на рис.3.16.

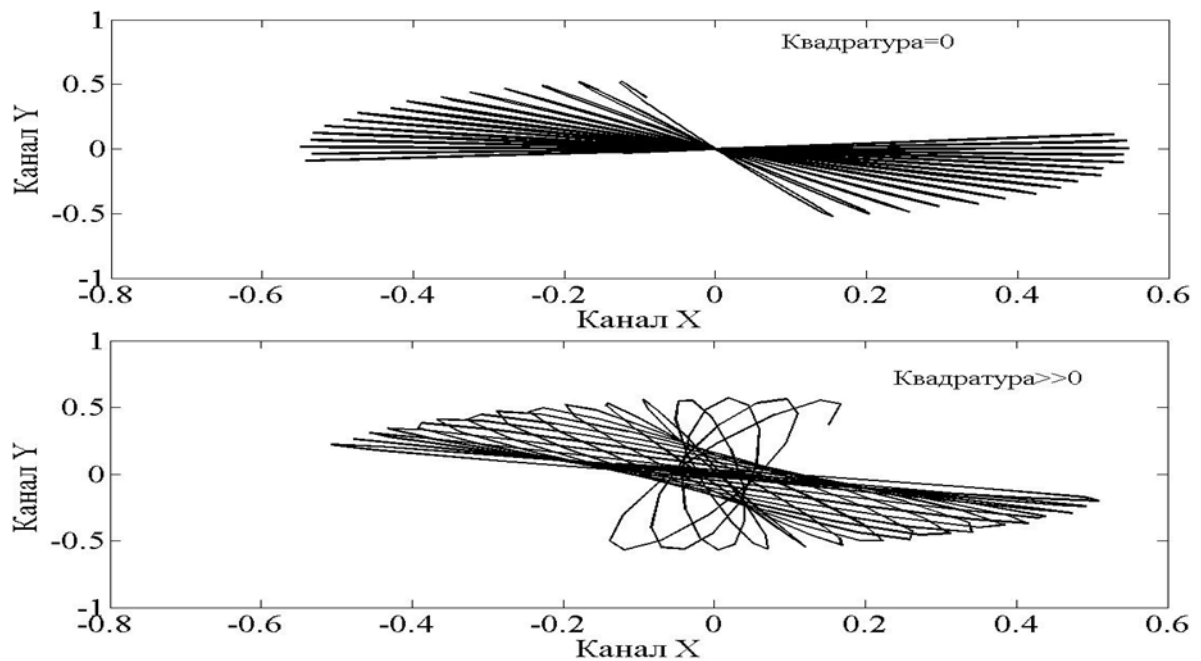


Рис.3.16. Траєкторія руху точки на резонаторі в ідеальному та реальному резонаторах

Коли КВГ працює в режимі КВГ-ДКШ кутова швидкість, яка вимірюється, компенсується, і при вимірюванні великих кутових швидкостей потрібно формувати значну напругу зворотного зв'язку. Наприклад, КВГ з металевим резонатором зазвичай має значення масштабного коефіцієнта на рівні 40мВ/(град/с). При вимірюванні кутової швидкості  $5 \cdot 10^3$  град/с, буде потрібно напруга зворотного зв'язку 200В.

У режимі КВГ-І, кутова швидкість не компенсується, тому можна працювати в малих напругах, вимірюючи великі кутові швидкості.

На рис.3.17 представлено вимірювання кута за допомогою КВГ-І, коли кутова швидкість дорівнює  $5 \cdot 10^3$  град/с і носить періодичний характер. Похибка вимірювання кута інтегруючим КВГ, обумовлена неідеальністю резонатора, носить періодичний характер.

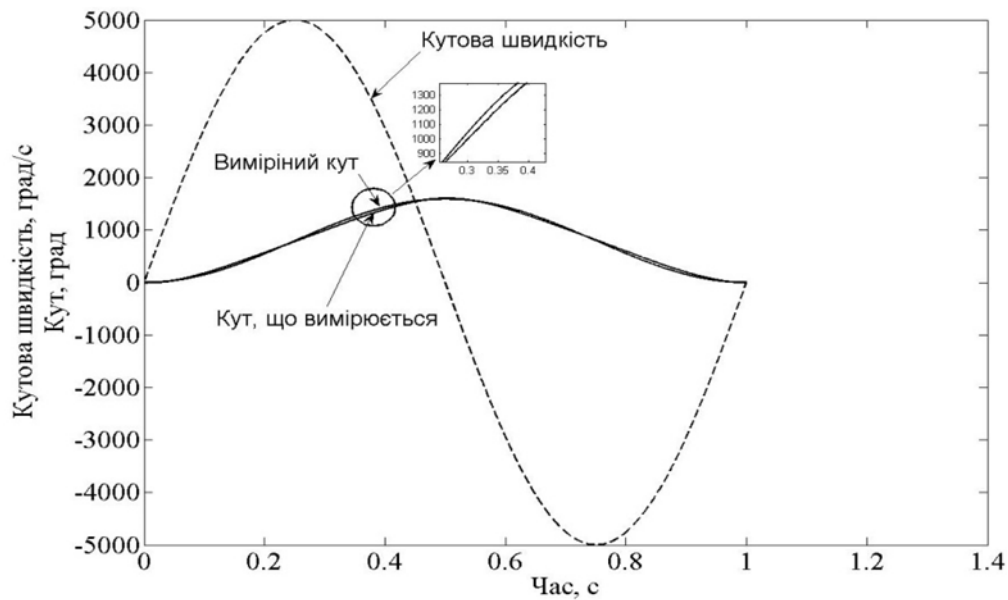


Рис.3.17. Результат вимірювання кута при кутовій швидкості  $5 \cdot 10^3$  град/с

Періодичний характер зміни похибки вимірювання кута КВГ-I добре видно на рис.3.18, де представлено вимірювання кута при постійній кутовій швидкості обертання величиною 90 град/с для ідеального та реального (не ідеального) резонаторів.

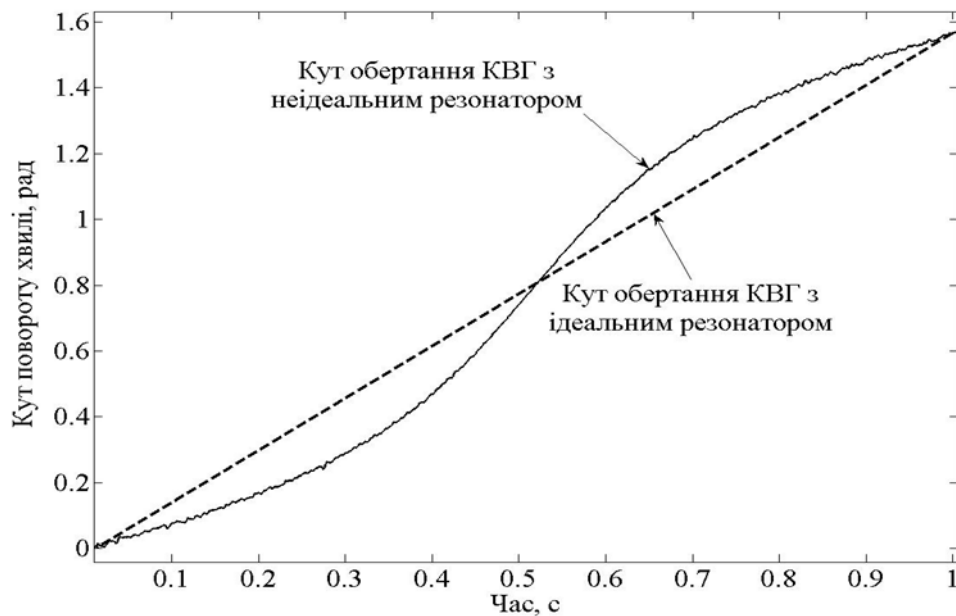


Рис.3.18. Вимірювання кута повороту КВГ-I при постійній кутовій швидкості обертання 90 град/с з ідеальним та не ідеальним резонаторами

### 3.3. Реалізація режимів роботи КВГ в одному приладі

КВГ відрізняється від інших гіроскопів, наприклад, кільцевих лазерних і волоконно-оптичних тим, що всі режими КВГ можуть бути реалізовані в одному цифровому варіанті КВГ з автоматичним переключенням режимів, що неможливо реалізувати в КЛГ і ВОГ. Цей факт дає КВГ незаперечні переваги перед КЛГ і ВОГ в частині діапазону кутових швидкостей, динамічної похибки при вимірюванні великих кутових швидкостей, шумів, а також надійності [32]. Наприклад, при вимірюванні малих кутових швидкостей доцільно працювати в режимі КВГ-ДКШ, а при збільшенні вимірюваної швидкості і частоти її вимірювання, щоб зменшити динамічну похибку, слід перейти на режим КВГ-І. У разі виникнення на траєкторії руху високих віброударних прискорень слід перейти на режим КВГ-ДКШ-Ді т.д.[33].

Більшість КВГ, включаючи МЕМС гіроскопи, працюють в режимі КВГ-ДКШ. Цей режим має досить великий діапазон виміру кутових швидкостей до 400-500 град/с, смугу частот, зазвичай 100Гц, і можуть бути реалізовані з малими шумами  $3 \times 10^{-3}$  град/ $\sqrt{\text{год}}$  і меншим дрейфом нуля до  $10^{-2}$  град/год.

КВГ-І відрізняється від КВГ-ДКШ і КВГ-ДКШ-Д високою стабільністю масштабного коефіцієнта, яким є коефіцієнт Брайана  $k$ . Цей коефіцієнт залежить від номера моди коливальних (який не змінюється) і дуже слабо залежить від геометрії резонатора. Так, без температурної корекції масштабного коефіцієнта, стабільність коефіцієнту КВГ-І, як правило, не гірше 0,01% в широкому діапазоні температур. Крім того, КВГ-І може мати смугу пропускання 500 Гц і вище, а діапазон вимірювання кутових швидкостей до 10000 град/с.

Жоден з існуючих на ринку гіроскопів не має таку високу «пристосовуваність» до вимірювання кутових швидкостей і кутів повороту в умовах навколишнього середовища, що постійно змінюються, як КВГ.

На рис.3.19 представлена повна нелінійна Matlab-Simulink модель КВГ, що реалізує всі три режими його роботи. Вона включає в себе блок вхідної

кутової швидкості, резонатор, перетворювачі  $G_x, G_y, D_x, D_y$  і блоками обробки інформації та формування сигналів управління на чутливий елемент.

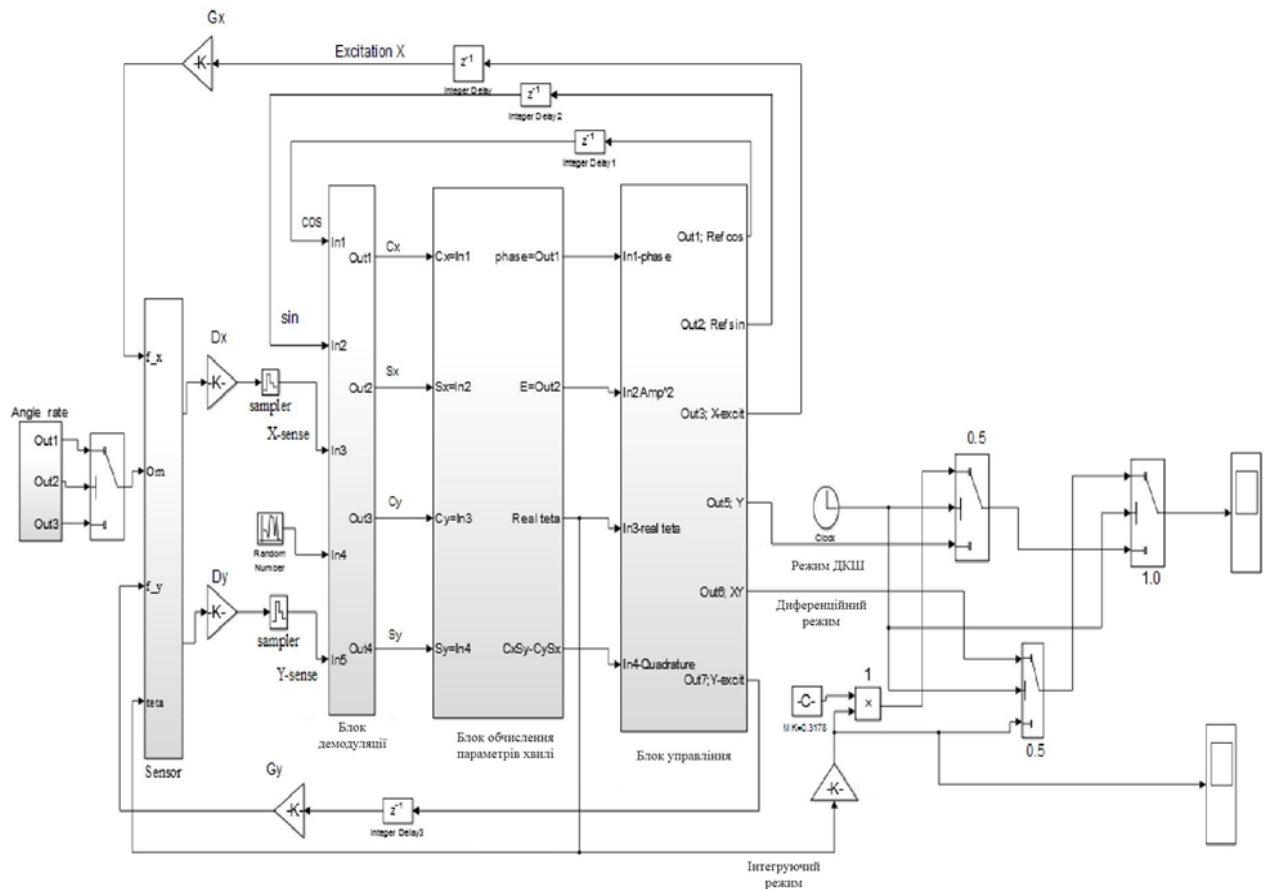


Рис.3.19. Повна нелінійна Matlab-Simulink модель КВГ, що реалізує три режими його роботи

У правій частині рис.3.19. представлено формування вихідних сигналів КВГ для трьох режимів його роботи – КВГ-ДКШ, КВГ-І, КВГ-ДКШ-Д. Алгоритм обробки інформації чутливого елементу і формування сигналів управління складається з блоку демодуляторів, які формують демодульовані сигнали  $C_x, S_x, C_y, S_y$ , на основі яких розраховуються параметри  $\alpha, q, F_r$  і  $\theta$ . У блоці управління формуються сигнали управління і вихідні сигнали про кутову швидкість або кут повороту в залежності від режиму роботи КВГ. Блок управління реалізує блок-схему системи управління пружною хвилею, що позначено штрих-пунктирним прямокутником на загальній блок-схемі КВГ, яка представлена на рис.3.20.



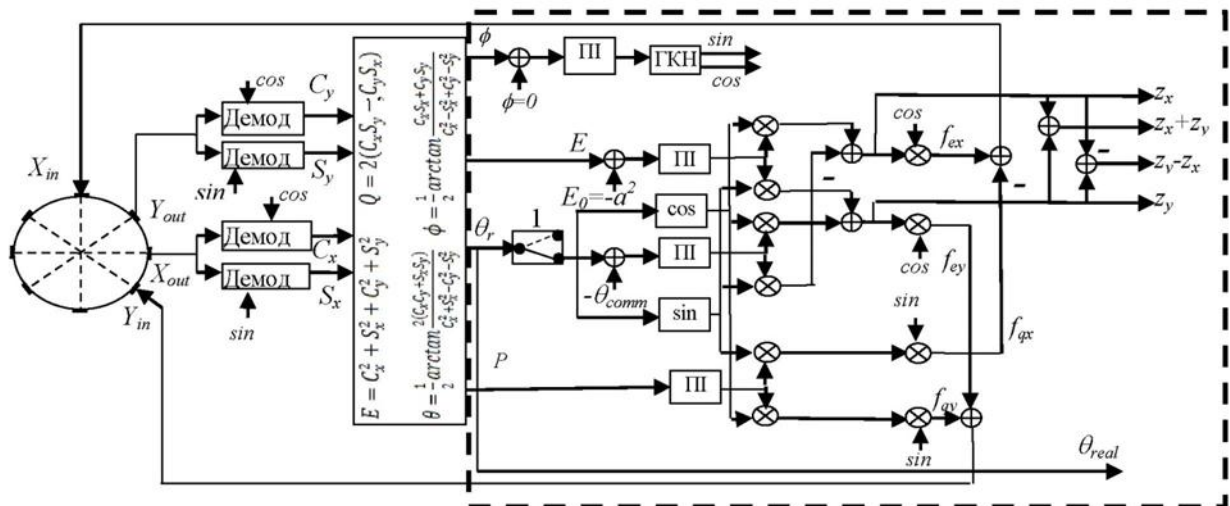


Рис.3.20. Блок схема багаторежимного КВГ з автоматичним перемиканням з режиму на режим

Ця блок схема реалізує багаторежимний ДКШ з можливістю автоматичного перемикання з режиму на режим. Коли перемикач 1 знаходиться у позиції, що зображено на рис.3.20 і кут  $\theta_{comm}$  зафіксовано у одному з наступних значень  $\theta_{comm} = 4m\pi, m = 0, 1, 2 \dots$ , пристрій працює у режимі КВГ-ДКШ. Коли ж кут  $\theta_{comm}$  зафіксовано на значенні, що відповідає  $\theta_{comm} \neq 4m\pi$ , він працює в режим КВГ-ДКШ-Д, а коли перемикач знаходиться у положенні «відкритий» (пунктирна лінія перемикача 1) то КВГ працює у режимі КВГ-І.

На рис.3.21 продемонстровано три режими роботи КВГ з автоматичним перемиканням з одного режиму на інший.

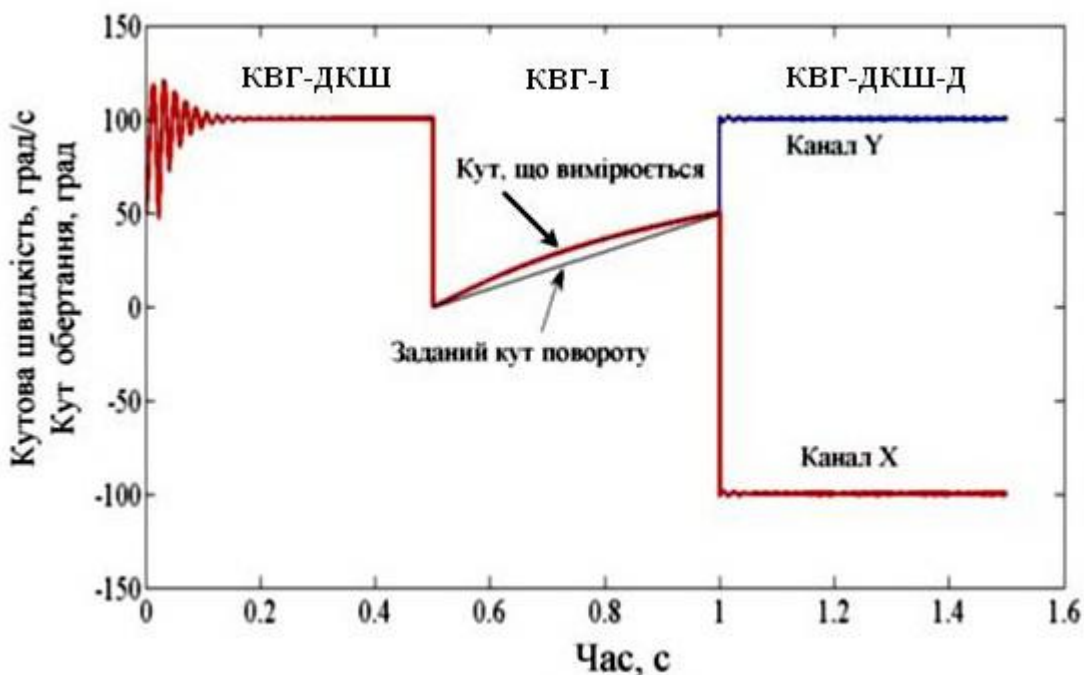


Рис.3.21. Вихідний сигнал трьох-режимного ДКШ

Першим, є режим датчика кутової швидкості, що вимірює до 100 град/с, потім відбулося перемикання на інтегруючий режим вимірювання, без зміни кутової швидкості. Відхилення показань від прямої лінії у цьому режимі виникає через неідеальність виготовлення резонатора. Потім відбувається перемикання на диференційний режим, з двома вихідними сигналами рівнем 100 град/с та -100 град/с.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Розглянуто шляхи підвищення точності систем стабілізації бортових систем навігації та керування рухом. Розроблено теорію та принципи побудови елементів і пристроїв комплексу стабілізатора озброєння для забезпечення високої точності наведення до 1 кут.хв. та високу точність стабілізації лінії візування, похибка якої не більше 20 кут.сек.

Проведено аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків стабілізаторів, який показав в необхідності заміни роторних гіротахometrів, виконавчих двигунів та підвищення швидкості обробки інформації в цифровому блоці керування.

Розроблено базову математичну модель роботи КВГ, як датчика кутової

швидкості зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збудженою силою Коріоліса. Розроблено блок схему управління КВГ-ДКШ та описано кожен з його ланок.

Розглянуто математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. Кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки.

Проведено випробування чутливості дослідного зразка КВГ-ДКШ-Д до ударних навантажень вздовж його осі чутливості. Дослід показує, що пікові значення каналу  $(X - Y)/2$  менші пікових значень  $X$  чи  $Y$  в 39 раз при ударах 5g, в 2 рази менші при ударах 20g та в 2,5 рази менші при ударах 100g.

Розглянуто математичну модель інтегруючого режиму роботи КВГ, коли сила Коріоліса не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. Побудовано блок схему та Matlab-Simulink-модель КВГ-І та проаналізовано роботу КВГ-І при швидкості обертання 90 град/с.

Розроблена повна нелінійна Matlab-Simulink-модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи: КВГ-ДКШ, КВГ-ДКШ-Д, КВГ-І. Ця схема реалізує багаторежимний ДКШ з можливістю автоматичного перемикання з режиму на режим.

### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння: монографія /О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, В.В. Чіковані.— Київ, 2014. — 176 С.

2. Безвесільна О.М. Випробування ендокера для використання у гіроскопічних приладах /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення». — 9 липня, Тернопіль, 2019. — №40. — С.76-79.

3. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2019. — №2(69). — С.21-25.

4. Безвесільна О.М. Розширення діагностики відмов стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Матеріали науково-практичної конференції «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». — 28-29 червня, Ужгород, Видавництво «Молодий вчений» 2019. — С.44-49.

5. Безвесільна О.М. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». — 23 Jul., Австрія, Відень, 2019. — №3. — С.44-46.

6. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в výroбах легкої бронетехніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2019)». — 21-22 травня, НАУ, Київ, 2019. — С.262-264.

7. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №9(73). — С.219-226.

8. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. —Хмельницький, 2019. — №3(273). — С.158-163.

9. Петренко О.В. Шляхи підвищення точності стабілізації /О.В. Петренко, М.В. Ільченко // VII науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки». — 9-10 жовтня, Київ, 2019. — С.216-217.

10. Безвесільна О.М. Математична модель та технічні характеристики гіротахметра ГТ-46/ Безвесільна О.М., Цірук В.Г., Козюков Д.С. // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки). — 43604, 2018. — С.92-93.

11. Безвесільна О.М. Коріолісовий вібраційний гіроскоп, як чутливий елемент комплексу управління системи стабілізації /О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, А.Г. Ткачук // Технологічні комплекси. — Луцьк, 2014. — №2(10). — С.142-147.

12. Безвесільна О.М. Перспективний чутливий елемент стабілізатора СВУ-500-7Ц підвищеної точності /О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук // 16-та Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». — КПІ ім.Ігоря Сікорського, Київ, 2018. — С.

13. Патент на корисну модель 127341 Україна, МПК Н02К 3/00. Електричний двигун постійного струму / Безвесільна О.М., Мірошник С.В., Малярів С.П., Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». №u201802152; заявл.02.03.2018; опубл.25.07.2018, Бюл. №14.

14. O.Bezvesilna. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system — Kharkiv, 2020. — №1/9(103) 2020. — PP. 39-45.

15. Комплект конструкторської та технологічної документації приладу «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-03» /Г.Є. Янкелевич, Ю.М. Кохан, Л.О. Кулінич, О.В. Петренко, С.П. Малярів, В.С. Адаменко, В.Г. Цірук // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір №54855. – зареєстроване 19.05.2014.

16. Комплект конструкторської та технологічної документації приладу «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-04» /Г.Є. Янкелевич, Ю.М. Кохан, Л.О. Кулінич,

О.В. Петренко, С.П. Маляров, В.С. Адаменко, В.Г. Цірук // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54790. – зареєстроване 15.05.2014.

17. Chikovani V. V. Performance parameters comparison of ring laser, Coriolis vibratory and fiber-optic gyros based on allan variance analysis /V. V. Chikovani // IEEE 2-nd Int. Conf. Proc. «Actual problems of unmanned air vehicles development». — 15-17 Oct., NAU, Kyiv, Ukraine, 2013. — С.153-156.

18. Цірук В.Г. Режими роботи вібраційного гіроскопу /В.Г. Цірук, В.В. Чіковані // VII МНТК «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІПРТК-2014)». — Київ, 2014. — С.295-296.

19. Патент на корисну модель 121394 Україна, МПК G01C 19/56. Вібраційний гіроскоп з компенсацією зміщення нуля / Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В., Крамаренко М.М.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». №u201703313; заявл.06.04.2017; опубл.11.12.2017, Бюл. №23.

20. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. — Хмельницький, 2019. — №4(275). — С.169-175.

21. Lynch D. Vibratory gyro analysis by the method of averaging /D. Lynch // Proc. 2nd St. Petersburg conf. on gyroscopic technology and navigation. — 24-25 May, St. Petersburg, Russia, 1995. — PP.26-34.

22. Безвесільна О.М. Дослідження системи стеження коріолісового гіроскопа за резонансною частотою /О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, А.Г. Ткачук, А.О. Просюк, Н.В. Самсонова, О.М. Хомяк // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». — 2015. — №3/2(23). — С.4-7.

23. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431™. — 2004. — P.69.

24. Chikovani V. V. Trends of Ukrainian all digital Coriolis vibratory gyroscopes development /V. V. Chikovani // IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods

and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). — 14-17 Oct., NAU, 2014. — PP.25-28.

25. Jagannathan S. Adaptive force-balancing control of MEMS gyroscope with actuator limits /S. Jagannathan, M. Hameed // Proceedings of American Control Conference. — 30 June-2 July, 2004. — №2. — PP.1862-1867.

26. Park S. Adaptive control strategies for MEMS gyroscopes /S. Park.— 2000. — 179 P.

27. Chikovani V. V. The compensated differential CVG /V.V. Chikovani, E.O. Umakhanov, P.I. Marusyk // Gyro Technology: Symposium. — 16-17 Sep., Karlsruhe university, Germany, 2008. — PP.3.1-3.8.

28. Chikovani V. V. Differential mode of operation for ring-like resonator CVG /V. V. Chikovani, O. A. Suschenko // IEEE Proc. Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — 15-18 Apr., Kyiv, Ukraine, 2014. — PP.451-455.

29. Chikovani V. V. Differential mode of operation for multimode vibratory gyroscope /V. V. Chikovani, H. V. Tsiрук // IEEE Proc. Intern. Conf. on Actual Problem of Unmanned Aerial vehicles Development (APUAVD). — 13-15 Oct., NAU, Kyiv, Ukraine, 2015. — PP.87-90.

30. Chikovani V. V. Low-cost multi-functional metallic resonator vibratory gyroscope /V.V. Chikovani // МатеріалиХІІ міжнародноїнауково-технічноїконференції «Авіа-2015». — NAU, Kyiv, Ukraine, 2015. — PP.13.5-13.13.

31. Луин Б.С. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах /В.А. Матвеев, Б.С. Луин, М.А. Басараб.— Москва. : Физмалит, 2008. — 240 P.

32. Чиковани В.В. Методика и расчет среднего времени наработки на отказ по результатам испытаний Кориолисового вибрационного гироскопа /В.В. Чиковани, С.П. Маляров // Військового-технічний збірник. — Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, Львів, 2011. — №2(5). — С.119-124.

33. Chikovani V. V. Triple-mode vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, H. V. Tsiruk, O. Korolova // Військово-технічний збірник. — Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, Львів, 2018. — №18. — РР.18-25.



## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ НА ПОХИБКИ КВГ

Після того, як гіроскоп виготовлений (проведена збірка, налаштування) він, як правило, не має високих точносних характеристик (стабільність нуля, масштабного коефіцієнта та ін.). Для отримання високих точносних характеристик, які здатний забезпечити гіроскоп, застосовуються процедури калібрування і корекції в діапазоні експлуатаційних параметрів.

Процедури калібрування і корекції, по суті, виявляють залежності похибок гіроскопів від зміни параметрів навколишнього середовища. Діапазон експлуатаційних параметрів залежить від типу об'єкта і, тому, залежно від того на якому об'єкті буде використовуватися гіроскоп, призначаються види і діапазони зміни параметрів навколишнього середовища для корекції похибок гіроскопа, викликаних цими змінами, з метою збільшення його точності. Існує також залежність експлуатаційних параметрів від призначення об'єкта (військове чи цивільне). Експлуатаційні параметри, головним чином для об'єктів військового призначення, визначаються відповідними стандартами.

Експлуатаційні умови повинні бути реалізовані на випробувальних стендах заводу-виробника гіроскопів для проведення калібрувальних процедур. Внаслідок того, що калібрувальні процедури вимагають реалізації нормованих (точно заданих і відомих) параметрів експлуатації і нормованих вхідних сигналів, що подаються на гіроскоп, стенди, які реалізують ці експлуатаційні параметри і вхідні сигнали, є складними і дорогими виробами (термокамери, обертаючі платформи з'єднані з термокамерами, центрифуги, вібростенди, ударні стенди та ін.) [1].

Крім того, калібрувальні процедури, як правило, трудомісткі і тривалі. Залежно від обсягу калібрувальних випробувань, зростає і собівартість гіроскопа і для деяких застосувань, де потрібно провести великий обсяг випробувань, може зрівнятися або навіть перевищити собівартість його виготовлення (особливо таких низьких за собівартістю гіроскопів, як КВГ з

металевим резонатором). Тому часто ставиться завдання збільшення ефективності проведення калібрувальних процедур, наприклад, за рахунок їх спрощення, збільшення кількості параметрів, які калібруються в одному випробуванні, скорочення часу випробування на кожен параметр. У зв'язку з цим стає дуже важливим впровадження автоматизації калібрування, тобто управління випробувальним обладнанням та розрахунку калібрувальних коефіцієнтів, а також їх введення в математичне забезпечення гіроскопа (для цифрового варіанту гіроскопа) за допомогою комп'ютера. У цьому випадку буде потрібно мінімальна кількість персоналу, що скоротить витрати на проведення калібрувальних процедур.

Ефективним засобом скорочення витрат на калібрувальні процедури є також і кількість гіроскопів, які одночасно проходять калібровочну процедуру. Це залежить від обсягів робочого простору стендів (ефективного робочого об'єму термокамер, площі платформ обертальних стендів і ін.), а також від кількості стандартного і нестандартного обладнання, які забезпечують калібрувальні випробування. Це таке обладнання як: пристрій прийому і передачі сигналів гіроскопів, джерела живлення, струмозйомники та ін.

Після проведення калібрувальних процедур і запровадження калібрувальних коефіцієнтів у математичне забезпечення гіроскопа, проводиться паспортизація параметрів гіроскопа. Процедура паспортизації гіроскопа багато в чому повторює процедуру калібрування, тільки при паспортизації повинні бути визначені (розраховані за даними випробувань) точності параметри гіроскопа (стабільність зміщення нуля, стабільність масштабного коефіцієнта, його нелінійність, повторюваність і інші характеристики), які записуються в технічний паспорт приладу. Кількість параметрів, які характеризують точність приладу в різних умовах експлуатації у будь-якого гіроскопа налічується кілька десятків. Таким чином, кількість параметрів, що паспортизуються, вказуються в технічному паспорті приладу, по суті, є компромісом між виробником і споживачем.

Обчислення параметрів гіроскопа за результатами вимірювань, наприклад, алгоритм обчислення зсуву нуля, нелінійності масштабного коефіцієнта і інших параметрів не мають єдиного підходу у фахівців, як з боку споживачів, так і з боку виробників. Також існують розбіжності і по методикам виміру. Тому, зазвичай, методики вимірювання параметрів гіроскопів узгоджуються з замовником (споживачем).

У даному розділі запропоновані методики вимірювання та обчислення основних параметрів КВГ. Розглядаються алгоритми корекції зміщення нуля, масштабного коефіцієнта і інших специфічних параметрів КВГ, що поліпшують його точність при роботі, в основному, в широкому діапазоні температур. Будуть розглянуті можливі варіанти калібрувальних процедур, що скорочують час випробувань і додатково поліпшують точність калібрування.

#### **4.1. Вплив температури на фази сигналів КВГ та їх корекція**

##### **4.1.1. Дія впливу температури на фази сигналів КВГ**

Основною причиною наявності зміщення нуля вібраційного гіроскопа є різнодобротність резонатора[2]. Іншою причиною, що призводить до зміщення нуля є похибка розташування електрода зняття сигналу вторинної хвилі (відмінність від  $45^\circ$ ), яка часто перевищує ту, що з теоретичної точки зору є основною, тобто різнодобротність.

Різночастотність резонатора визначає квадратурну компоненту сигналу вторинної хвилі, що теоретично є ортогональною до сигналу кутової швидкості (коріолісового сигналу) та сигналу зміщення нуля, що виникає із-за різнодобротності резонатору. Однак похибки настроювання фаз сигналів призводять до того, що ортогональність порушується, і тоді частина квадратурної компоненти сигналу потрапляє до коріолісової компоненти (тобто до сигналу кутової швидкості) і підсумовується зі зміщенням нуля, а до квадратурної компоненти потрапляє сигнал кутової швидкості.

В зв'язку з тим, що ці сигнали проходять через п'єзокерамічні пластини, що мають ємність, їх фази змінюються, а значення ємності п'єзоелектричного

електроду залежить від температури [3]. Таким чином, порушення фазових відношень між цими сигналами призводить до їх взаємного впливу, що змінюється від температури.

Насамперед, потрібно виявити ступінь впливу не ортогональних компонент сигналів один на одного визначити кути неортогональності по результатам вимірів. Виявити закономірність зміни фаз у залежності від температури. Побудувати алгоритм корекції та порівняти зміщення нуля та дрейфу вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором до і після корекції.

#### **4.1.2. Взаємний вплив сигналів квадратури та збудження**

Взаємний вплив сигналів, які повинні бути теоретично ортогональними видно на рис.4.1, де показані сигнали квадратури та збудження при обертанні гіроскопа.

Якщо частина кутової швидкості з'являється в сигналах збудження та квадратури, то і відповідна частина сигналів квадратури та збудження присутні в кутовій швидкості і проявляється в якості похибки вимірювання.

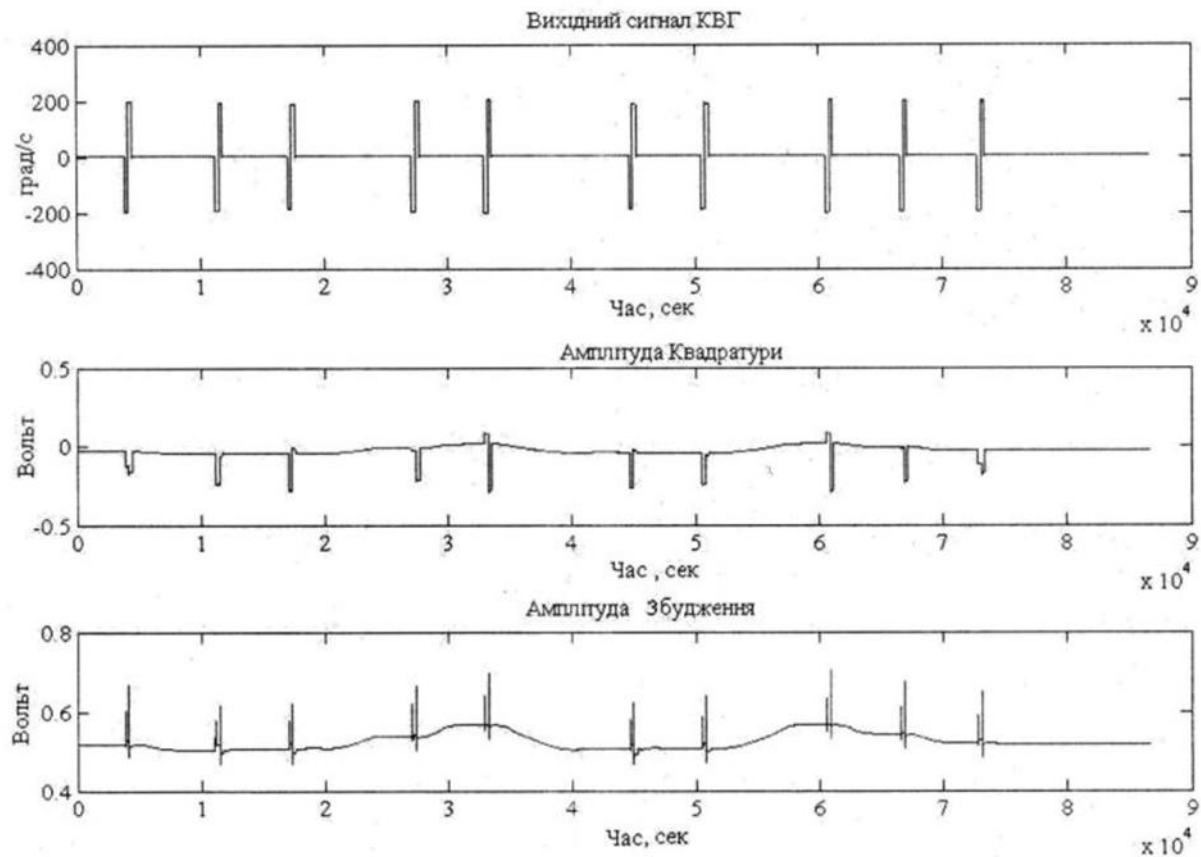


Рис.4.1. Сигнали амплітуди квадратури та збудження при обертанні КВГ

Таким чином, для підвищення точності КВГ прояв кутової швидкості на сигналах квадратури та збудження слід зменшити (компенсувати), що означатиме зменшення впливу цих сигналів на кутову швидкість та на зміщення нуля.

Для зменшення взаємовпливу цих сигналів, слід визначити кути не ортогональності між цими сигналами [4]:

$$\sin \alpha_E = \frac{V_E^+ - V_E^-}{V_\Omega^+ - V_\Omega^-}; \quad \sin \alpha_Q = \frac{V_Q^+ - V_Q^-}{V_\Omega^+ - V_\Omega^-}, \quad (4.1)$$

де,  $\alpha_E$  – кут не ортогональності між вихідним сигналом та сигналом збудження,  $\alpha_Q$  – кут не ортогональності між вихідним сигналом та сигналом квадратури,  $V_E^+$ ,  $V_E^-$  – значення амплітуди збудження при обертанні гіроскопа з кутовою швидкістю  $\pm\Omega$ ,  $V_Q^+$ ,  $V_Q^-$  – значення амплітуди квадратури при обертанні гіроскопа зі швидкістю  $\pm\Omega$ ,  $V_\Omega^+$ ,  $V_\Omega^-$  – значення вихідного сигналу гіроскопа при кутовій швидкості  $\pm\Omega$ .

Після визначення кутів  $\alpha_E$  та  $\alpha_Q$ , вводяться корекції сигналів  $V_\Omega$ , пропорційного кутовій швидкості,  $V_Q$  квадратури та  $V_E$  збудження:

$$\begin{aligned} V_{\Omega corr} &= V_\Omega \cos \alpha_Q + V_Q \sin \alpha_Q; \\ V_{Q corr} &= V_Q \cos \alpha_Q - V_\Omega \sin \alpha_Q, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} V_{\Omega corr2} &= V_{\Omega corr} \cos \alpha_E + V_E \sin \alpha_E; \\ V_{E corr} &= V_E \cos \alpha_E - V_{\Omega corr} \sin \alpha_E, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де  $V_{\Omega corr2}$  – результуючий вихідний сигнал гіроскопа.

Вирази (4.2) та (4.3) описують поворот векторів  $V_\Omega$ ,  $V_Q$  та  $V_E$  так, щоб вектор  $V_\Omega$  був перпендикулярним векторам  $V_Q$  та  $V_E$ . На рис.4.2 представлена векторна діаграма сигналів до (рис.4.2а) та після (рис.4.2б) корекції.

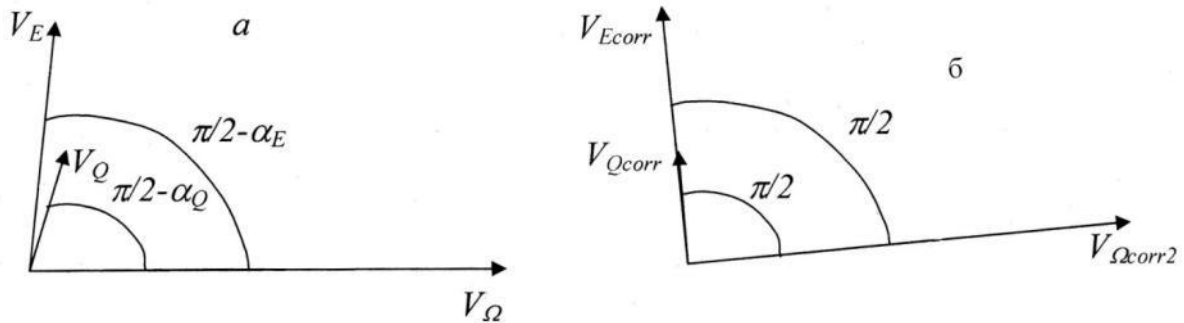


Рис.4.2. Векторна діаграма сигналів  $V_\Omega$ ,  $V_Q$  та  $V_E$  до (а) та після (б) корекції

Розглянемо температурну корекцію фаз сигналів КВГ.

#### 4.1.3. Температурна корекція фаз сигналів КВГ

В реальному гіроскопі кути  $\alpha_E$  та  $\alpha_Q$  залежать від температури, тому ці кути слід калібрувати по температурному діапазону.

На рис. 4.3 та 4.4 представлені крапками виміряні значення  $\alpha_Q$  та  $\alpha_E$  на різних температурах з діапазону  $[-40 \dots +75]^\circ\text{C}$  для вібраційних гіроскопів з металевим резонатором. Суцільною лінією представлені поліноми другого порядку, що апроксимують виміри, проведені з використанням методу найменших квадратів.

Таким чином, достатньо апроксимувати залежності  $\alpha_E$  та  $\alpha_Q$  від температури  $T$  кривою другого порядку, тобто:

$$\begin{aligned}\alpha_Q(T) &= a_{0Q} + a_{1Q}T + a_{2Q}T^2; \\ \alpha_E(T) &= c_{0E} + c_{1E}T + c_{2E}T^2,\end{aligned}\tag{4.4}$$

де  $a_{0Q}$ ,  $a_{1Q}$ ,  $a_{2Q}$ ,  $c_{0E}$ ,  $c_{1E}$ ,  $c_{2E}$  – коефіцієнти корекції  $\alpha_Q$  та  $\alpha_E$  по температурі.

Як видно з рис.4.3 та 4.4, значення  $\alpha_Q$  значно перевищують значення  $\alpha_E$ , але навіть такі малі значення суттєво впливають на зміщенню нуля КВГ.

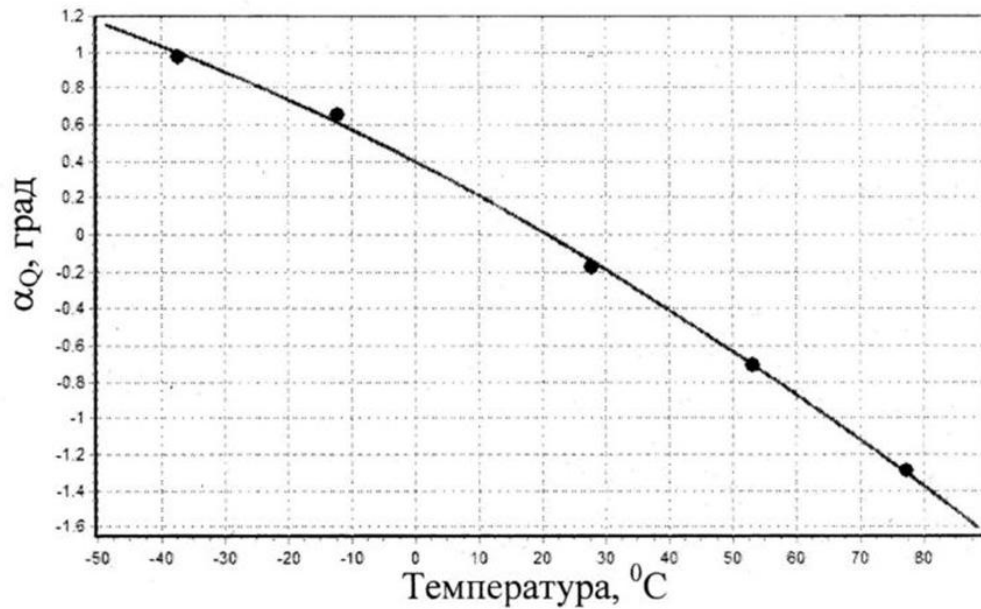


Рис.4.3. Графік залежності  $\alpha_Q$  від температури

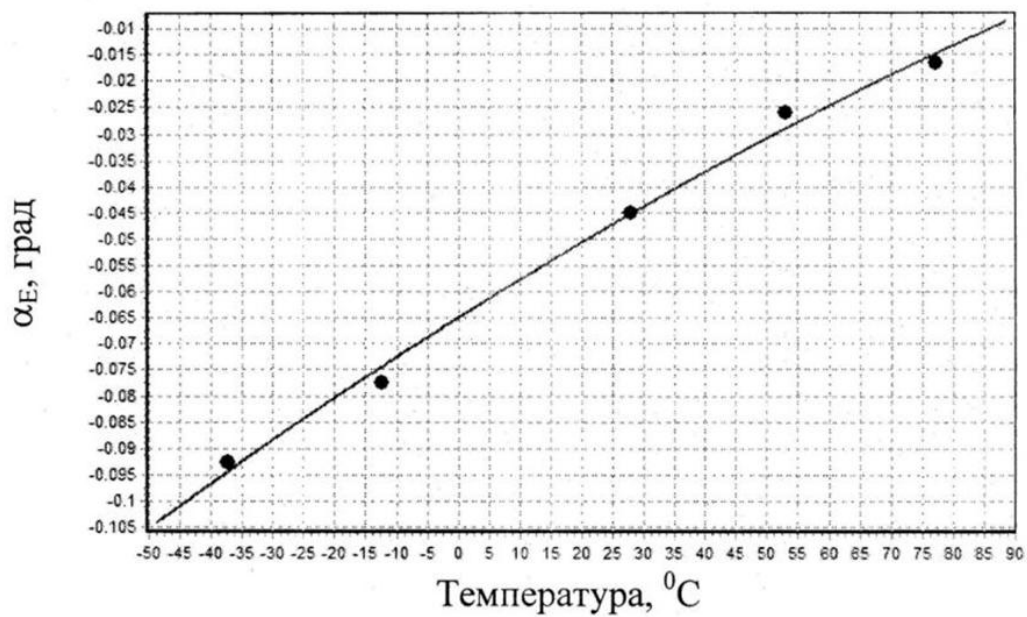


Рис.4.4. Графік залежності  $\alpha_E$  від температури

На рис.4.5 представлений результат введення корекційних коефіцієнтів на сигнал збудження.

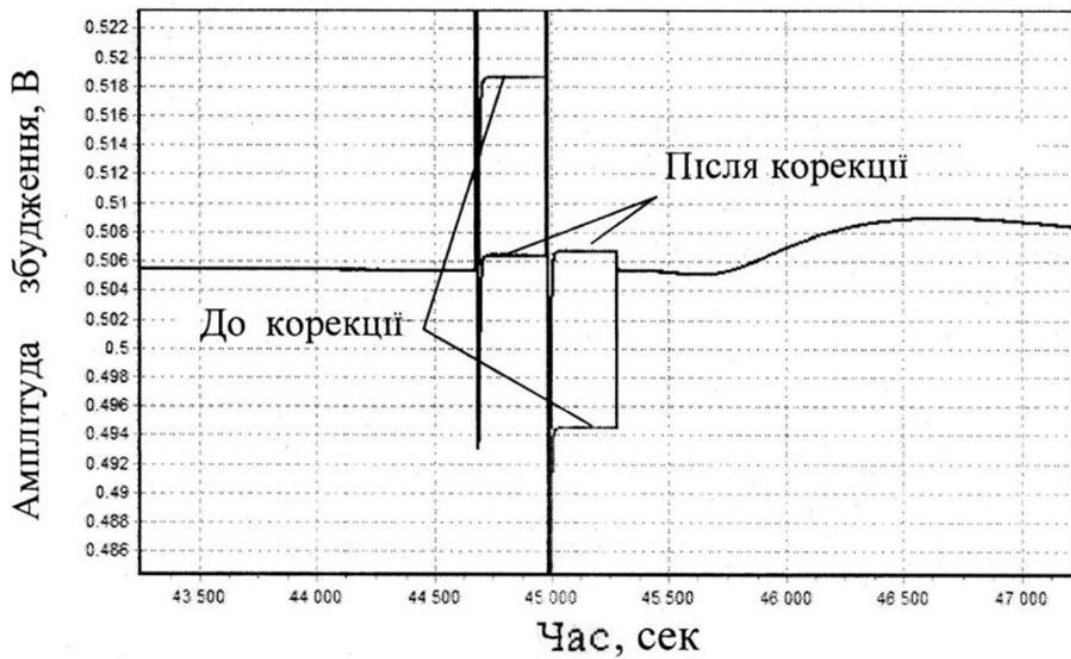


Рис.4.5. Амплітуда збудження до та після корекції  $\alpha_Q$  та  $\alpha_E$

На рис.4.6 представлено результат впливу корекції  $\alpha_Q$  та  $\alpha_E$  на зміщення нуля КВГ та його дрейф.

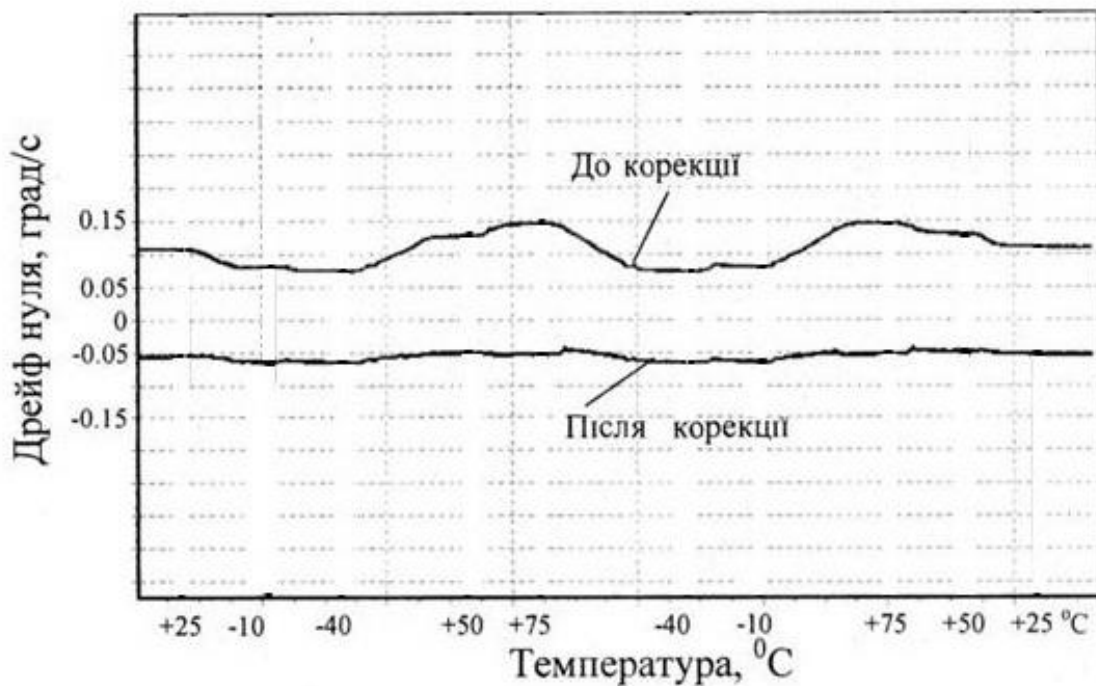


Рис.4.6. Дрейф нуля КВГ до та після корекції  $\alpha_Q$  та  $\alpha_E$



Як видно із графіків, представлених на рис.4.6, середнє значення зміщення нуля до корекції і після корекції в температурному діапазоні  $[-40 \dots +75]^{\circ}\text{C}$  зменшився у 3 рази, а максимум-мінімум дрейфу нуля до корекції і після корекції зменшився приблизно у 4,5 рази.

Слід зазначити, що дрейф, який залишився, можливо ефективно зменшити безпосередньо калібруванням дрейфу нуля.

Внаслідок наявності похибок налаштування фаз сигналів і залежності ємності електродів від температури, порушується ортогональність компонентів сигналів управління хвилею вібраційного гіроскопа. В результаті цього в зміщенні нуля гіроскопа, крім сигналу пропорціонального різнодобротності присутня частина сигналу квадратури.

Також, частина сигналу кутової швидкості присутня в сигналі квадратури. Ці частки змінюються від температури.

Температурна залежність фазових неузгодженостей носить параболічний характер. Температурна корекція фазових неузгодженостей зменшує середнє значення зміщення нуля вібраційного гіроскопа з металевим резонатором в 3 рази, а варіацію дрейфу зміщення нуля в 4,5 разів.

## **4.2.Вплив температури на зміщення нуля КВГта його корекція**

### **4.2.1. Зміщення нуля у вібраційних гіроскопах**

Зміщенням нуля гіроскопа є усереднений за заданий інтервал часу його вихідний сигнал, що вимірюється при заданих умовах навколишнього середовища, який не корельований з його вхідним сигналом. Зміщення нуля зазвичай вимірюється в град/год або для гіроскопів грубої точності в град/с [5].

Некорельованність, тобто відсутність взаємозв'язку між входом і виходом, гіроскопа може бути досягнута тоді, коли вхідний сигнал дорівнює нулю, тобто кутова швидкість обертання відсутня. Відсутність кутової швидкості на вході гіроскопа можлива, коли гіроскоп встановлений на розв'язаний від будівлі фундаменті, а його ВЧ перпендикулярна кутовій

швидкості обертання Землі (наприклад, ВЧ лежить в площині горизонту і спрямована на Схід).

На практиці, в залежності від точності гіроскопа, спрощують умови вимірювання зміщення нуля, орієнтуючи ВЧ гіроскопа вертикально вгору і віднімаючи з показань гіроскопа вертикальну компоненту кутової швидкості обертання Землі, яку можна обчислити за виразом  $\Omega_{ehor} = \Omega_e \sin \varphi$ , знаючи широту  $\varphi$  місця установки гіроскопа і відняти від показань гіроскопа. При цьому передбачається, що динамічна похибка гіроскопа при вимірюванні малої кутової швидкості  $\Omega_{ehor}$  нехтовно мала, у порівнянні зі зміщенням нуля.

Розв'язаний фундамент необхідний для того, щоб виключити вплив додаткових кутових швидкостей, які можуть виникнути при переміщеннях персоналу по випробувальній лабораторії. Як правило, ці додаткові кутові швидкості є невідомими і значно перевищують  $\Omega_{ehor}$ .

Дрейфом нуля гіроскопа називається компонента вихідного сигналу гіроскопа функціонально незалежна від вхідного кутової швидкості.

Таким чином, в дрейф нуля входить нестабільність нуля (компонента дрейфу, яка має спектральну щільність потужності виду  $1/f$ , тобто флікер шуму). Крім цього в дрейфі нуля є компоненти типу: білого шуму, шуму з незалежними приростами (типу броунівського руху), марківський шум та ін. З наведених тут визначень слідує, що дрейф нуля гіроскопа складається з безлічі компонентів, які можуть представлені у вигляді класифікаційної блок схеми, представленої на рис.4.7.

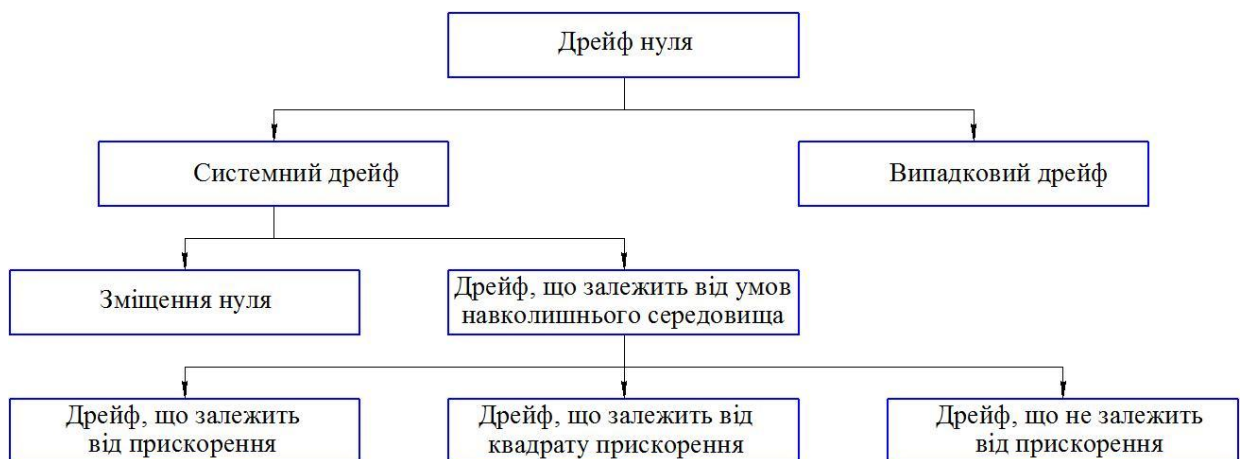


Рис.4.7. Компоненти дрейфу гіроскопа

З цієї блок схеми випливає, що систематичний дрейф гіроскопа складається зі зміщення нуля і дрейфу зміщення нуля, що залежить від умов навколишнього середовища.

До складу дрейфу нуля, залежного від умов навколишнього середовища, входять компоненти дрейфу, що залежать від прискорення і квадрату прискорення, а також дрейф, незалежний від прискорення, тобто залежний від температури, вологості, магнітного та електромагнітного полів та ін.

Дрейфом, залежним від прискорення називається систематична складова дрейфу, яка залежить від першого степеня лінійного прискорення, що діє на гіроскоп і зазвичай виражається в град/год/g.

Дрейфом, залежним від квадрата прискорення називається систематична складова дрейфу, яка залежить від другого степеня або від добутку двох компонентів лінійного прискорення, що діє на гіроскоп і зазвичай виражається в град/год/g<sup>2</sup>.

Випадковим дрейфом називають складову дрейфу гіроскопа, яка випадково змінюється з часом.

Випадковий дрейф гіроскопа складається з наступних складових:

1. Шум квантування: випадковий шум в оцифрованому вихідному сигналі гіроскопа з кінцевою довжиною слова. Результируюча похибка розподілена по рівномірному закону в інтервалі  $\pm 1/2$  найменшого значущого біта (LSB).

2. Випадковий увід: Гаусовий випадковий процес з незалежними приростами нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням ( $\sigma$ ) зростаючим з часом як  $\sqrt{t}$ .

2.1 Випадковий увід кута: наростаюча з часом кутова похибка, обумовлена наявністю білого шуму у вихідному сигналі гіроскопа. Ця похибка має розмірність град/ $\sqrt{\text{год}}$ .

2.2 Випадковий увід кутової швидкості: наростаюча з часом похибка в кутовий швидкості, обумовлена наявністю білого шуму в кутовому прискоренні (похідної вихідного сигналу гіроскопа). Ця похибка має розмірність (град/год)/ $\sqrt{\text{год}}$  = град/год<sup>3/2</sup>.

#### 4.2.2. Модель вихідного сигналу КВГ

Рівняння моделі вихідного сигналу КВГ висловлює зв'язок між входом і виходом гіроскопа і може бути представлена в наступному вигляді:

$$V = (SF + \Delta SF)\Omega + D, \quad (4.5)$$

де  $V$  – вихідний сигнал КВГ в вольтах або цифровому коді,  $SF$  – масштабний коефіцієнт КВГ,  $\Delta SF$  – похибка масштабного коефіцієнта,  $\Omega$  – вимірювана кутова швидкість,  $D$  – дрейф нуля КВГ.

Дрейф нуля КВГ, відповідно до блок-схемою (рис.4.7), представляється у вигляді:

$$D = D_B + E + D_R, \quad (4.6)$$

де  $D_B$  – зміщення нуля,  $E$  – дрейф, що залежить від параметрів навколишнього середовища,  $D_R$  – випадкова складова дрейфу нуля КВГ.

Зміщення нуля  $D_B$  – це постійна величина, яка може змінюватися від включення до включення приладу (тобто мати не повторюваність) в деякому діапазоні значень.

Дрейф, що залежить від параметрів навколишнього середовища можна представити у вигляді наступних складових:

$$E = D_T \Delta T + \overrightarrow{D_{VT}} \nabla T + D_{\dot{T}} \dot{T} + D_c \alpha_{VR} + D_{SR} \alpha_{VSR} + D_a \alpha + D_{R1} \alpha_{VOF}(\omega_x + \omega_y) + D_{RBB} \alpha_{RBB} + \dots \quad (4.7)$$

де  $D_T \Delta T$  – дрейф, обумовлений зміною температури  $\Delta T$  з коефіцієнтом температурної чутливості  $D_T$ ;  $\overrightarrow{D_{VT}} \nabla T$  – дрейф, обумовлений градієнтом температур  $\nabla T$ , з коефіцієнтом чутливості до градієнту температур  $\overrightarrow{D_{VT}}$ ;  $D_{\dot{T}} \dot{T}$  – дрейф, обумовлений швидкістю зміни температури  $\dot{T}$ , з коефіцієнтом чутливості  $D_{\dot{T}}$ ;  $D_c \alpha_{VR}$  – дрейф, обумовлений кінчною похибкою, що викликана лінійною вібрацією  $\alpha_{VR}$  поблизу резонансної частоти, з коефіцієнтом чутливості  $D_c$  до кінчного руху, який викликаний цією вібрацією;  $D_{SR} \alpha_{VSR}$  – дрейф, обумовлений лінійною вібрацією  $\alpha_{VSR}$  поблизу резонансної частоти конструкції, з коефіцієнтом чутливості  $D_{SR}$ ;  $D_a \alpha$  – дрейф, обумовлений

лінійним прискоренням, що дій по будь-якій осі, з коефіцієнтом чутливості  $D_a$  по цій осі;  $D_{R1}a_{VOF}(\omega_x + \omega_y)$  – дрейф, обумовлений лінійною вібрацією  $a_{VOF}$  поблизу резонансної частоти та постійними кутовими швидкостями  $\omega_x + \omega_y$  навколо осей, перпендикулярних осі чутливості КВГ з коефіцієнтом  $D_{R1}$ ;  $D_{RBB}a_{RBB}$  – дрейф, обумовлений широкополосною лінійною вібрацією  $a_{RBB}$ , пов’язаною з несиметричністю розташування електродів зйому сигналу.

Випадкова складова дрейфу нуля КВГ представлена у вигляді:

$$D_R = D_{RN} + D_{RB} + D_{RK} + D_{RR} + D_{RM} + D_{RQ}, \quad (4.8)$$

де  $D_{RN}$  – випадковий дрейф, обумовлений випадковим уходом кута (інтегралу від вихідного сигналу КВГ) з коефіцієнтом  $N$ , що вимірюється в град/ $\sqrt{\text{год}}$ ;  $D_{RB}$  – випадковий дрейф, обумовлений нестабільністю зміщення нуля з коефіцієнтом  $B$ , що вимірюється в град/год;  $D_{RK}$  – випадковий дрейф, обумовлений випадковим уходом кутової швидкості з коефіцієнтом  $K$ , що вимірюється в град/год<sup>3/2</sup>;  $D_{RR}$  – випадковий дрейф, обумовлений трендом в вихідному сигналі КВГ з коефіцієнтом  $R$ , що вимірюється в град/год<sup>2</sup>;  $D_{RM}$  – випадковий дрейф, обумовлений наявністю марківського експоненціального корельованого випадкового процесу в вихідному сигналі КВГ з коефіцієнтом  $M$ ;  $D_{RQ}$  – випадковий дрейф, обумовлений квантуванням вихідного сигналу КВГ з коефіцієнтом  $Q$ , що вимірюється в град.

До представленої такої моделі похибок зміщення нуля КВГ можуть бути додані і інші складові похибки. Наприклад, похибки викликані варіацією питомої напруги, магнітного та/або електромагнітного полів та ін., в залежності від конкретного застосування.

#### 4.2.3. Температурна корекція вихідного сигналу КВГ

Дрейф вихідного сигналу вібраційного гіроскопу є найважливішим показником його точності. При зміні температури в процесі зміни кутової швидкості змінюються практично всі параметри гіроскопа: струми та напруги в електронних каскадах із-за зміни опору провідників; властивості матеріалу, із

якого виготовляють чутливий елемент; виникнення механічних напруг в місцях з'єднання деталей з різними коефіцієнтами теплового розширення, тощо. Врахувати всі фактори, що діють в гіроскопі під дією температури, є складною, але водночас і найважливішою задачею.

У відомих способах калібрування вихідного сигналу [6] вібраційного гіроскопу є суттєві недоліки. Спосіб калібрування вихідного сигналу, який полягає в тому, що вимірюються вихідний сигнал гіроскопа і температура гіроскопа у не менше, ніж двох фіксованих значеннях температури, обчисленні калібрувальних значень коефіцієнтів температурної моделі і компенсації температурної похибки з використанням вичислених коефіцієнтів є недосконалим, оскільки виміри здійснюються на фіксованих температурах чутливого елемента. Час встановлення температури всередині чутливого елемента, як правило, не менше 1 години. В цей час виміри не здійснюються, оскільки вихідні сигнали змінюються і їх виміри призводять до похибок обчислювання коефіцієнтів моделі. Такий час встановлення температури втрачається на кожній фіксованій температурі. Якщо прийняти лінійну модель залежності вихідного сигналу від температури, то необхідно визначити коефіцієнти моделі на двох фіксованих температурах. Для поліноміальної моделі другого порядку (парабола) знадобиться три фіксовані температури. Цей спосіб також призводить до зростання похибок компенсації, бо в практичних умовах експлуатації, якщо спеціально не стабілізувати температуру, діятимуть температурні градієнти.

Також слід зазначити, що вихідний сигнал залежить не тільки від температури, але і від резонансної частоти вібрації та інших сигналів [7, 8]. Крім того, датчик температури, який, як правило, встановлюють на електронній платі, показує температуру плати в точці його установки, а резонансна частота є функція просторового розподілу температури за об'ємом резонатора, як частини чутливого елемента гіроскопа і значно точніше описує зміну вихідного сигналу.

При зміні температури виникають градієнти температур при яких не виконуються пропорційні залежності, а виникають нелінійності, що призводять до зростання похибки калібрування і, відповідно, похибки компенсації вихідного сигналу [9, 10].

На рис.4.8 представлені вихідний сигнал вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором в діапазоні температур  $[-40 + 75]^{\circ}\text{C}$  при швидкості зміни температури  $1^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Вимірювання температури проводилося датчиком, який розміщувався на електронній платі гіроскопа тому, із-за нагріву плати в процесі роботи гіроскопа інтервал температур усередині гіроскопа змістився на  $12 - 15^{\circ}\text{C}$  у бік великих значень.

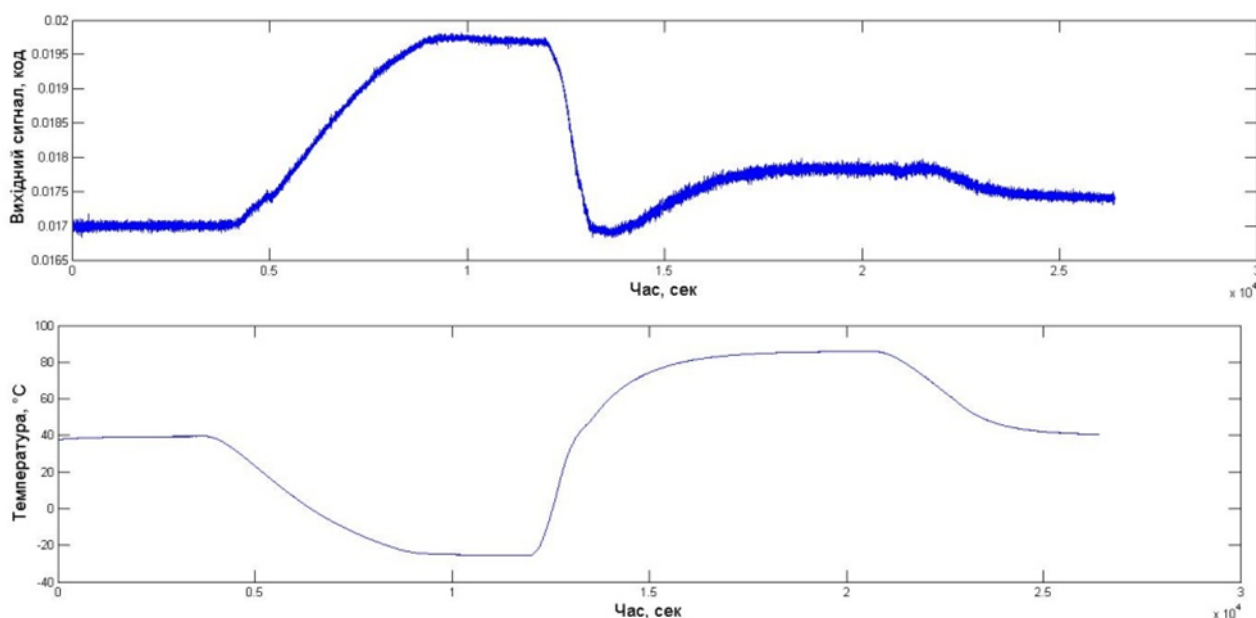


Рис.4.8. Вихідний сигнал КВГ та датчика температури

Для порівняння точності компенсації температурної похибки вихідного сигналу, на рис.4.9 представлені крива 1 вимірів вихідного сигналу гіроскопа кожну секунду і значення вихідного сигналу, що апроксимуються параболою – крива 2.

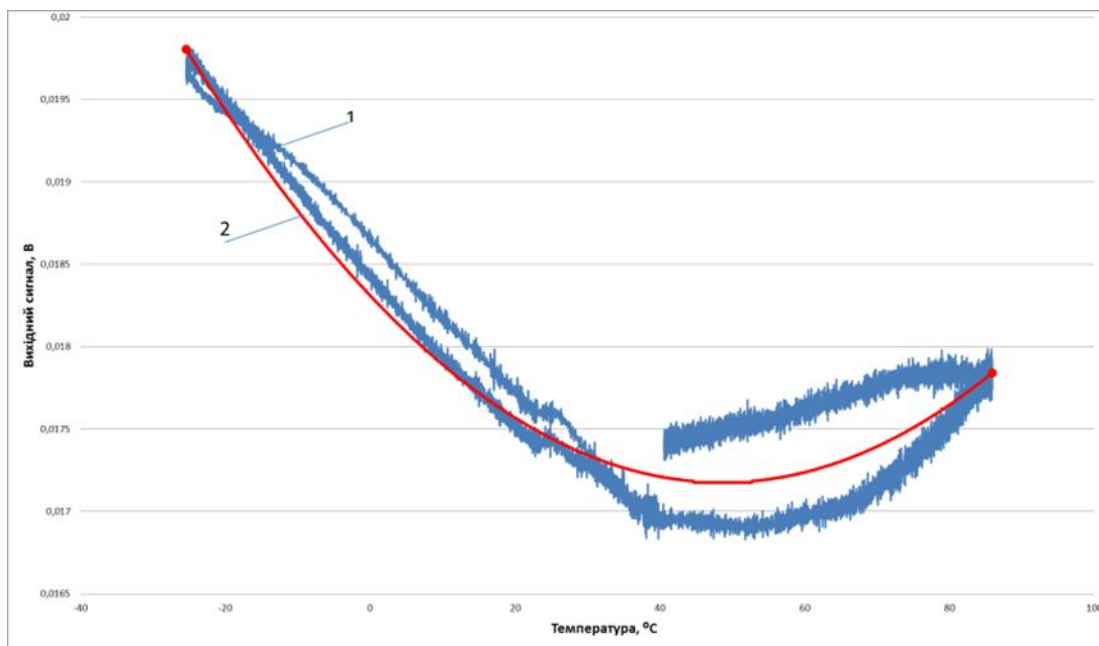


Рис.4.9. Зміна вихідного сигналу на градієнті температур

На стабілізованих температурах значення вихідного сигналу практично рівні між собою, проте при зміні температури, їх значення істотно відрізняються. Крім того, на рис.4.9 видно гистерезис вихідного сигналу. Гистерезис проявляється через те, що вихідний сигнал змінюється по-різному при нагріві і охолодженні на одному і тому ж інтервалі температур. При цьому утворюється гистерезисна петля, яку можна бачити на кривій 1 (рис.4.9) і якої немає на кривій 2 (рис.4.9), що додає похибку, яку не можливо скорегувати в існуючій моделі.

Підвищення точності температурної компенсації вихідного сигналу гіроскопа забезпечується за рахунок додаткових вимірювань резонансної частоти, сигналу квадратури та сигналу збудження, які забезпечують повніший і точніший опис змін вихідного сигналу вібраційного гіроскопа при зміні температури [11].

Додаткові сигнали вводяться в модель вихідного сигналу у вигляді полінома, а для визначення коефіцієнтів полінома використовується метод множинної регресії, який дозволяє отримувати стійкі оцінки коефіцієнтів за наявності шуму у вимірюваних сигналах.

Після того, як коефіцієнти полінома визначені, їх використовують для визначення дрейфу нуля по показникам датчика температури.



Корекція вихідного сигналу гіроскопа в процесі виміру кутової швидкості проводиться наступним чином:

$$\begin{aligned} V_{\text{кор}}^i(T_i) &= a^T \vec{T}_i, \\ \Omega_i &= \frac{(V_{\text{вих}}^i - V_{\text{кор}}^i(T_i))}{SF}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

де:  $\vec{T}_i$  – вектор, сформований по змінній температурі в  $i$ -й момент часу;  $V_{\text{кор}}^i(T_i)$  – дрейф нуля, розрахований по температурі в  $i$ -й момент часу;  $a^T$  – транспонований вектор коефіцієнтів полінома;  $\Omega_i$  – коректоване значення кутової швидкості в  $i$ -й момент часу;  $V_{\text{вих}}^i$  – визначений в  $i$ -й момент часу вихідний сигнал гіроскопа;  $SF$  – значення масштабного коефіцієнту.

Для температурної залежності дрейфу нуля, вираз для оцінки коефіцієнтів полінома запишемо в наступному вигляді:

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{V}, \quad (4.10)$$

де  $\vec{a}$  – вектор коефіцієнтів полінома;  $X$  – матриця замірів;  $\vec{V}$  – вектор змін зміщення нуля на  $i$ -й температурі.

Враховуючи додаткові параметри, матриця  $X$  набуде наступного вигляду:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & T_1 & T_1^2 & T_1^3 & A_{361} & A_{361}^2 & A_{361}^3 & A_{\text{KB1}} & A_{\text{KB1}}^2 & A_{\text{KB1}}^3 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_n & T_n^2 & T_n^3 & A_{36n} & A_{36n}^2 & A_{36n}^3 & A_{\text{KBn}} & A_{\text{KBn}}^2 & A_{\text{KBn}}^3 & f_n & f_n^2 & f_n^3 \end{pmatrix}; \quad (4.11)$$

Враховуючи, що є можливість визначити реальне значення зміщення нуля в момент включення, коли об'єкт не рухається, то коефіцієнт  $a_0$  можна не вимірювати, а вводити в модель після його визначення та зменшити значення резонансної частоти шляхом віднімання деякого опорного значення  $f_0$ , тобто  $\Delta f_i = f_i - f_0$ , де  $f_i$  – значення резонансної частоти в  $i$ -й момент часу, матриця  $X$  запишеться так:

$$X = \begin{pmatrix} T_1 & T_1^2 & T_1^3 & A_{361} & A_{361}^2 & A_{361}^3 & A_{\text{KB1}} & A_{\text{KB1}}^2 & A_{\text{KB1}}^3 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_n & T_n^2 & T_n^3 & A_{36n} & A_{36n}^2 & A_{36n}^3 & A_{\text{KBn}} & A_{\text{KBn}}^2 & A_{\text{KBn}}^3 & f_n & f_n^2 & f_n^3 \end{pmatrix}; \quad (4.12)$$

На рис.4.10 представлені дві криві: крива 1 – виміри вихідного сигналу кожну секунду в діапазоні температур, а крива 2 – розрахункова крива, отримана по моделі (4.9), коефіцієнти якої були обчислені за методом

множинної регресії (формули (4.10), (4.12)), для наступних параметрів моделі:  
 $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 3$ ;  $F_0 = 4937,7$  Гц,  $A_0 = Q_0 = T_0 = 0$ ;  $n = 26400$  сек.  
 $\approx 7.3$  години.

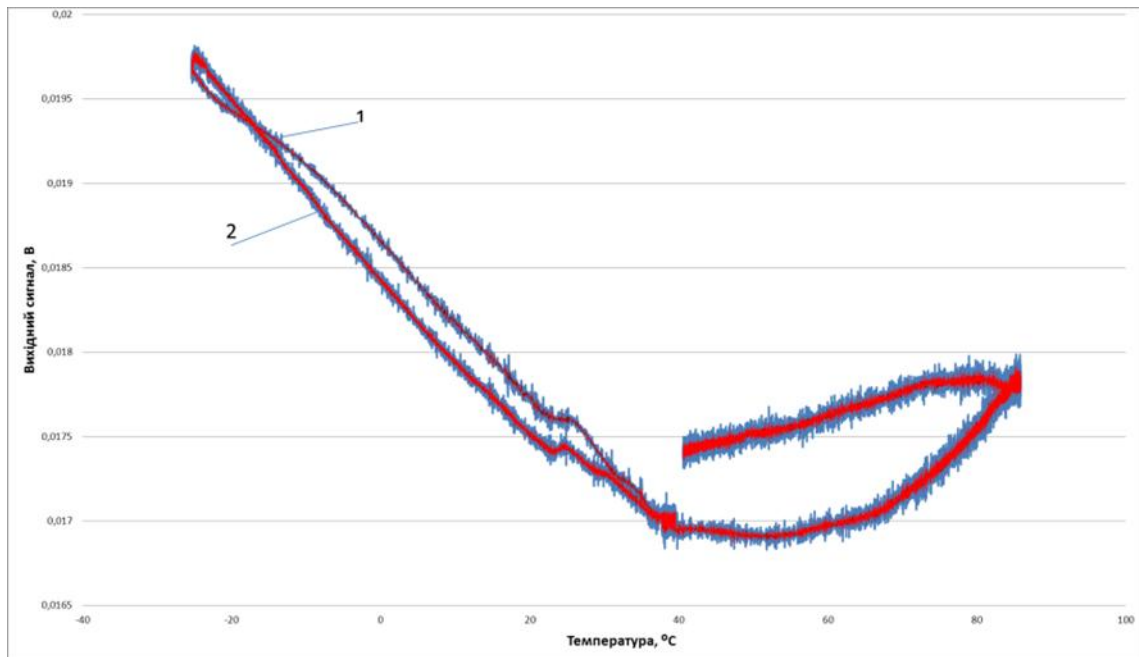


Рис.4.10. Значення вихідного сигналу в діапазоні температур

Різниця між кривими 1 и 2 рис.4.10 визначає похибку компенсації дрейфу вихідного сигналу. Графік цієї різниці, тобто похибку компенсації вихідного сигналу, представлений нарис.4.11.

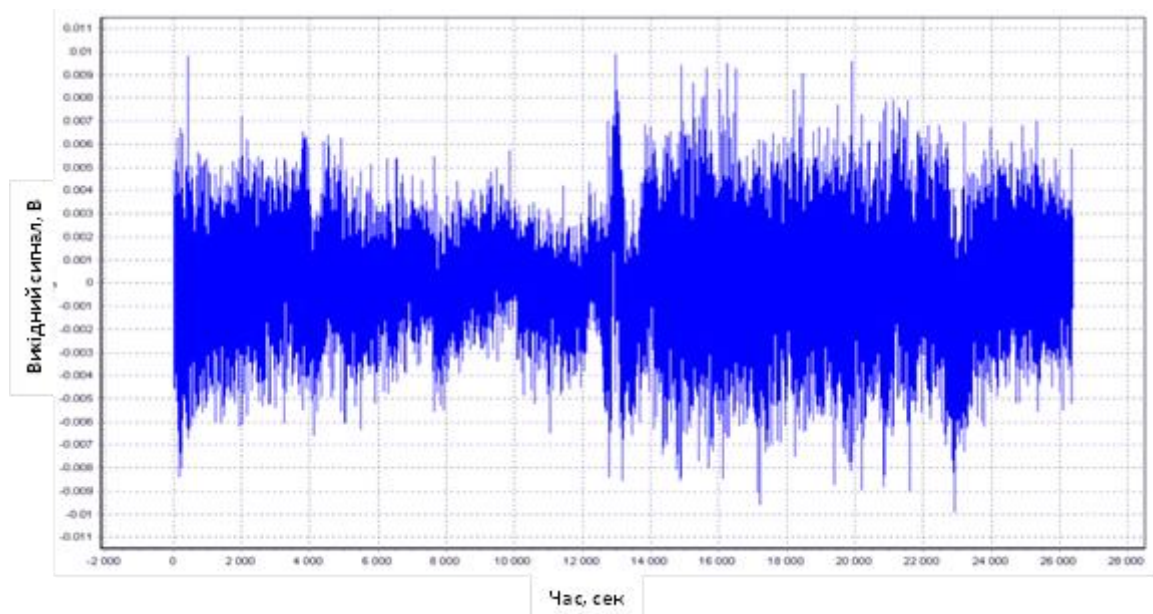


Рис.4.11. Похибка компенсації дрейфу вихідного сигналу

Середньоквадратична похибка компенсації сигналу в діапазоні температур дорівнює 0,038 %, що у 10 разів менше ніж за способом існуючої моделі (0,4 %).

Слід зазначити, що замість поліноміальної моделі зазначеного вище типу, можуть використовуватися моделі складені з поліномів Лежандра, Лагера, Чебишева або експоненціальні, полігармонічні та інші, які можуть бути нелінійними відносно оцінюваних параметрів і, в цьому випадку, використовувати метод нелінійної регресії для їх оцінки.

### **4.3. Вплив температури на масштабний коефіцієнт КВГ та його корекція**

#### **4.3.1. Масштабний коефіцієнт вібраційного гіроскопа**

Масштабним коефіцієнтом називається призначене для вимірювання відношення зміни сигналу на виході гіроскопа до зміни сигналу на його вході.

Масштабний коефіцієнт можна оцінити як нахил прямої лінії, проведеної методом найменших квадратів по вимірним даним входу і виходу гіроскопа, тобто нахил вихідної характеристики гіроскопа.

Так як вихідний сигнал гіроскопа містить не тільки вхідну кутову швидкість, але і зміщення нуля, то при вимірюванні масштабного коефіцієнта його слід виключати з показань гіроскопа. Як правило, крім створюваної нормованої (точно заданої і відомої) кутової швидкості, присутні і інші кутові швидкості.

Головні похибка масштабного коефіцієнта це його нестабільність, нелінійність і асиметрія.

*Нестабільністю* масштабного коефіцієнта називається міра його зміни при постійній дії заданого параметра, що характеризує умови роботи гіроскопа.

Одним з найбільш важливих параметрів для інерціальних датчиків є температура. Тому температурна нестабільність масштабного коефіцієнта вказується в технічному паспорті на гіроскоп. Нестабільність масштабного

коефіцієнта вимірюється у відсотках (або мільйонних частинах, проміле (ppm)) від його номінального значення, виміряного в усьому діапазоні зміни заданого параметра.

*Нелінійністю* масштабного коефіцієнта називається його відхилення від прямої лінії, проведеної методом найменших квадратів по даних вимірів вихідної характеристики гіроскопа.

Нелінійність масштабного коефіцієнта вимірюється у відсотках (або мільйонних частинах, проміле (ppm)) від значення масштабного коефіцієнта, виміряного у всьому вхідному діапазоні швидкостей.

*Асиметрією* масштабного коефіцієнта називається різниця між масштабними коефіцієнтами гіроскопа, вимірюваними для позитивної та рівній їй по абсолютній величині негативної вхідної кутової швидкості.

Асиметрія вимірюється у відсотках (або мільйонних частинах, проміле (ppm)) від значення масштабного коефіцієнта, виміряного у всьому вхідному діапазоні швидкостей.

Іноді, масштабним коефіцієнтом називають чутливістю гіроскопа, так як він визначає величину відгуку на вхідну кутову швидкість. Чим більше значення масштабного коефіцієнта гіроскопа, тим чутливіше гіроскоп тому, що на малий вхідний сигнал видає велику величину вихідного сигналу.

#### **4.3.2. Багатопараметрична модель масштабного коефіцієнта КВГ**

У відомих способах калібрування масштабного коефіцієнту вібраційного гіроскопу є суттєві недоліки [12–14], оскільки в них спочатку визначають залежність коефіцієнту підсилення каналу збудження від МК гіроскопа у заводських умовах, а потім обчислюють його по вимірах коефіцієнту підсилення в умовах експлуатації використовуючи пропорцію. При зміні температури виникають градієнти температур при яких не виконуються пропорційні залежності, а виникають нелінійності, що приводять до зростання похибки калібрування і, відповідно, похибки компенсації МК.

Існуючий спосіб калібрування МК аналогічний способу калібрування вихідного сигналу вібраційного гіроскопу. В нього закладені аналогічні похибки температурної компенсації.

Нарис.4.12 представлені вихідний сигнал КВГ в діапазоні температур  $[-40 + 75]^{\circ}\text{C}$  при швидкості зміни температури  $1^{\circ}\text{C}/\text{хв}$  і обертанні гіроскопа з кутової швидкістю  $200$  град/с. Вимірювання температури проводилося датчиком, який розміщувався на електронній платі гіроскопа тому, із-за нагріву плати в процесі роботи гіроскопа інтервал температур усередині гіроскопа змістився на  $6 - 7^{\circ}\text{C}$  у бік великих значень.

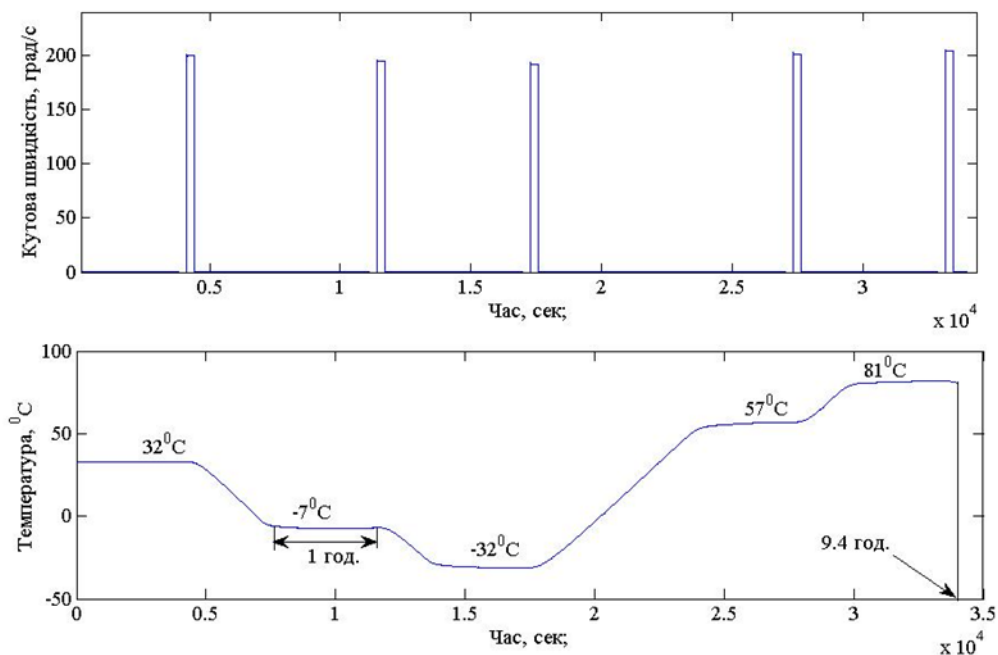


Рис.4.12. Вихідний сигнал КВГ та датчика температури

Для порівняння точності компенсації температурної похибки МК, на рис.4.13 представлені крива 1 вимірів МК гіроскопа кожну секунду і три значення МК (на графіці рис.4.13 помічені колами), що апроксимуються параболою. У цих вимірах кутова швидкість обертання гіроскопа дорівнює  $200$  град/с, зміщення нуля віднімалося з вимірів гіроскопа.

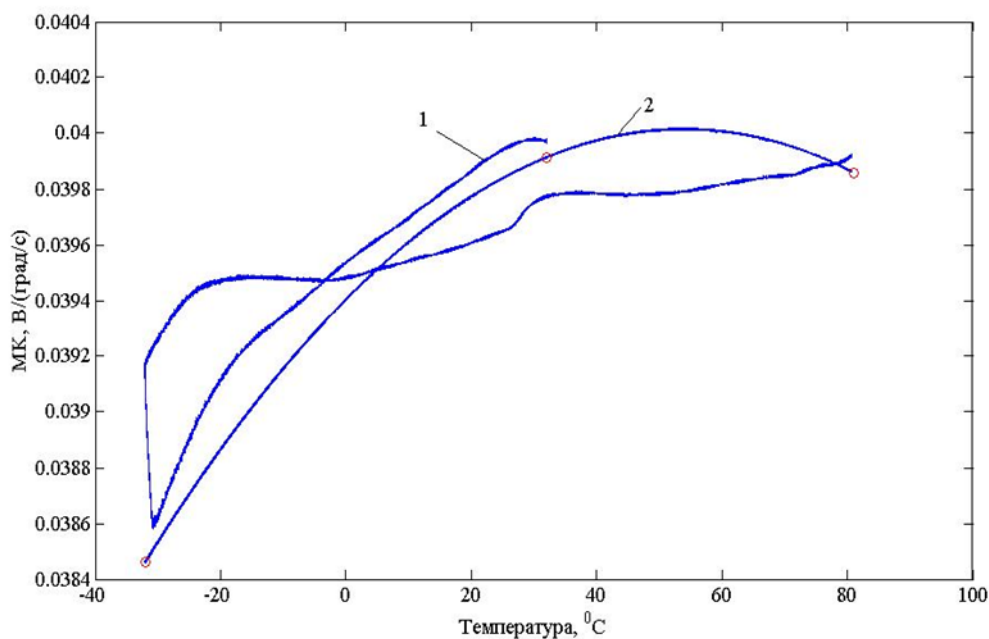


Рис.4.13. Зміна МК на градієнті температур

На стабілізованих температурах значення МК практично рівні між собою, проте при зміні температури, значення МК істотно відрізняються. Ця похибка у відсотках для негативних температур досягає майже 2%, а середньо квадратична похибка (СКП) в діапазоні температур дорівнює 0,6%. Крім того, на рис.4.13 видно гістерезис МК, якій добре відомий фахівцям і проявляється завжди для будь-якого гіроскопа. Гістерезис проявляється через те, що МК змінюється по різному при нагріві і охолодженні на одному і тому ж інтервалі температур. При цьому утворюється гістерезисна петля, яку можна бачити на кривій 1 (рис.4.13) і якої немає на кривій 2 (рис.4.13), що додає похибку, яку не можливо скорегувати в існуючій моделі [15].

Підвищення точності температурної компенсації МК гіроскопа забезпечується за рахунок додаткових вимірювань сигналів частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадратури, які забезпечують повніший і точніший опис змін МК вібраційного гіроскопа, особливо при зміні температури, враховуючи похибки, які виникають при розузгодженні фаз сигналів керування, а також змін коефіцієнтів підсилення електродів збудження вібрації та зняття інформації про вібрацію.

Додаткові сигнали вводяться в модель МК у вигляді полінома, а для визначення коефіцієнтів полінома використовується метод множинної регресії, який дозволяє отримувати стійкі оцінки коефіцієнтів за наявності шуму у вимірюваних сигналах [16, 17].

Вихідний сигнал гіроскопа  $V_{\text{вих}}$  записується наступним виразом:

$$V_{\text{вих}} = SF \cdot \Omega + B; \quad (4.13)$$

де  $SF$  – масштабний коефіцієнт;  $\Omega$  – фіксована кутова швидкість, що вимірюється;  $B$  – зміщення нуля гіроскопа.

Звідси витікає, що

$$SF = \frac{V_{\text{вих}}}{\Omega} = \frac{B}{\Omega}. \quad (4.14)$$

Якщо не враховувати другий доданок у правій частині рівняння (4.13), тобто зміщення нуля, то виникає методична похибка. Приймаючи поліноміальну модель залежності МК від додатково вимірюваних параметрів, запишемо наступну модель:

$$\begin{aligned} SF_i = SF_0 + \sum_{i_1=1}^{n_1} f_{i_1} (F_i - F_0)^{i_1} + \sum_{i_2=1}^{n_2} a_{i_2} (A_i - A_0)^{i_2} + \\ + \sum_{i_3=1}^{n_3} q_{i_3} (Q_i - Q_0)^{i_3} + \sum_{i_4=1}^{n_4} t_{i_4} (T_i - T_0)^{i_4}; \end{aligned} \quad (4.15)$$

де:  $SF_i, F_i, A_i, Q_i, T_i, i = 1 \dots n$  – виміри масштабного коефіцієнту, резонансної частоти резонатора, амплітуди збудження, амплітуди квадратури і температури гіроскопа, відповідно, а  $n$  – кількість вимірів;  $F_0, A_0, Q_0, T_0$  – опорні значення відповідних параметрів, які встановлюються заздалегідь, деякі з яких можуть дорівнювати нулю;  $SF_0$  – скаляр, що може оцінюється по результатам вимірів, чи може бути встановлений заздалегідь, наприклад,  $SF_0 = 0$ ;  $\vec{f}, \vec{a}, \vec{q}, \vec{t}$  – вектори коефіцієнтів моделі розмірності  $n_1, n_2, n_3, n_4$ , відповідно, які треба оцінювати по результатам вимірів.

Для оцінювання векторів коефіцієнтів моделі і можливого значення  $SF_0$  за результатами вимірів використовуємо метод множинної регресії [18]:

$$\begin{pmatrix} SF_0 \\ \vec{f} \\ \vec{a} \\ \vec{q} \\ \vec{t} \end{pmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T \begin{pmatrix} SF_1 \\ \vdots \\ SF_n \end{pmatrix}, \quad (4.16)$$

де  $M$  – матриця вимірів наступного виду:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \Delta F_1 & \dots & \Delta F_1^{n_1} & \Delta A_1 & \dots & \Delta A_1^{n_2} & \Delta Q_1 & \dots & \Delta Q_1^{n_3} & \Delta T_1 & \dots & \Delta T_1^{n_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta F_n & \dots & \Delta F_n^{n_1} & \Delta A_n & \dots & \Delta A_n^{n_2} & \Delta Q_n & \dots & \Delta Q_n^{n_3} & \Delta T_n & \dots & \Delta T_n^{n_4} \end{pmatrix}, \quad (4.17)$$

де  $\Delta F_i = F_i - F_0$ ;  $\Delta A_i = A_i - A_0$ ;  $\Delta Q = Q_i - Q_0$ ;  $\Delta T_i = T_i - T_0$ ;  $i = 1 \dots n$ .

На рис.4.14 представлені дві криві: крива 1 – виміри МК кожну секунду в діапазоні температур без інтервалів стабільної температури, а крива 2 – розрахункова крива, отримана по моделі (4.15), коефіцієнти якої були обчислені за методом множинної регресії (формули (4.16), (4.17)), для наступних параметрів моделі:  $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 3$ ;  $F_0 = 4997,2 \text{ Гц}$ ,  $A_0 = Q_0 = T_0 = 0$ ;  $SF_0 = 0$ ;  $n = 13700 \text{ сек.} \approx 3,8 \text{ години}$ .

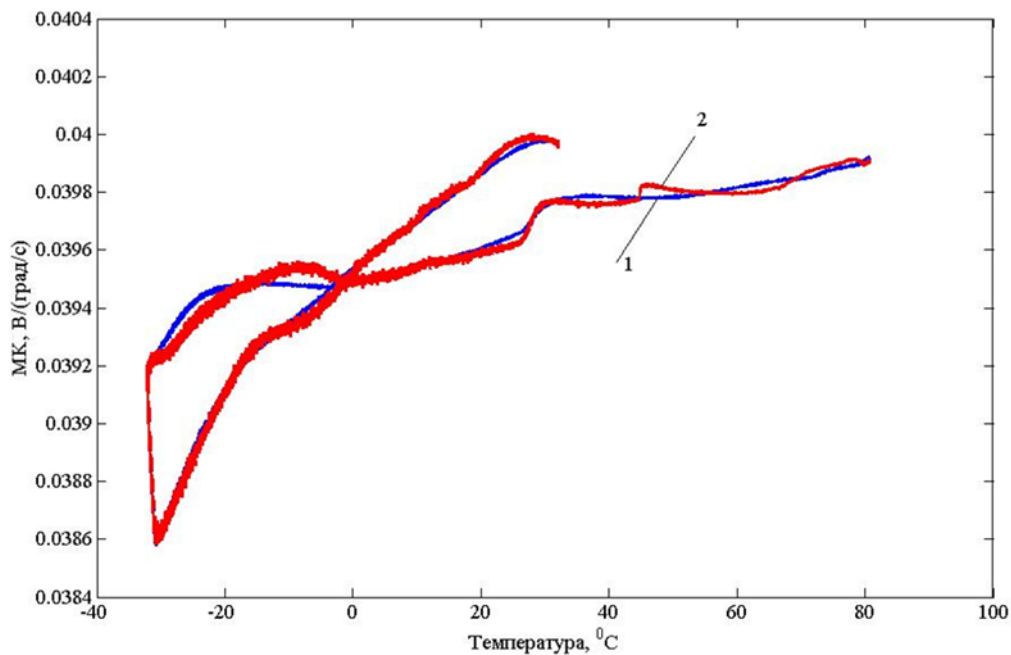


Рис.4.14. Значення МК в діапазоні температур

Різниця між кривими 1 та 2 рис.4.14 визначає похибку компенсації МК. Графік цієї різниці, тобто похибку компенсації МК, представлений на рис.4.15.



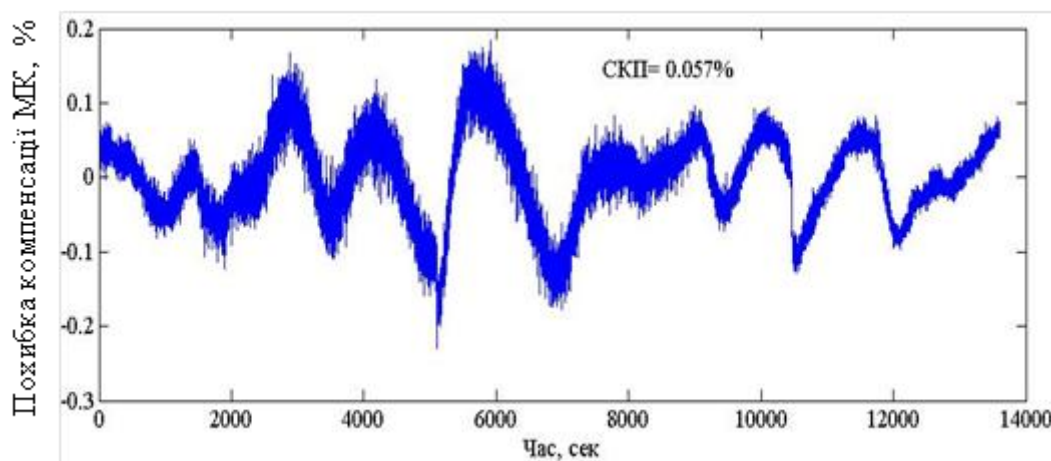


Рис.4.15. Похибка компенсації МК

Середньоквадратична похибка компенсації МК в діапазоні температур дорівнює 0,057%, що у 10 разів менше ніж за способом існуючої моделі (0,6 %).

Слід зазначити, що замість поліноміальної моделі зазначеного вище типу, можуть використовуватися моделі, складені з поліномів Лежандра, Лагера, Чебишева або експоненціальні, полігармонічні та інші, які можуть бути нелінійними відносно оцінюваних параметрів і, в цьому випадку, використовувати метод нелінійної регресії для їх оцінки.

#### 4.4. Паспортизація параметрів КВГ

Після калібрування (корекції) основних параметрів КВГ – зміщення нуля, масштабного коефіцієнта, корекції фаз сигналів ( $\alpha_E$ ,  $\alpha_Q$ ) – проводиться паспортизація його параметрів, які вказуються в технічному паспорті гіроскопа, що входить в комплект поставки. Технічний паспорт є офіційним документом виробника, що підтверджує якість приладу і, перш за все, – його точність. При виявленні факту невиконання точності гіроскопа хоча б по одному з вказаних в технічному паспорті параметрів, замовник може пред'явити рекламацию, а виробник повинен виправити або замінити прилад. Зазвичай, кількість параметрів, які паспортизуються для кожного гіроскопа, є предметом компромісу між замовником і виробником, так як вартість гіроскопа може істотно залежати від кількості параметрів, що паспортизуються. Однак на етапі

випробувань дослідних зразків паспортизують по можливості максимальну кількість параметрів, деякі з яких потім, при серійному виробництві, вказуються в паспорті без випробувань конкретного гіроскопа [19]. До таких параметрів, наприклад, відносяться параметри надійності: середній час напрацювання на відмову, ресурс, а також параметри ударо- і віброміцності. Часто в параметри паспортизації не входить асиметрія масштабного коефіцієнта, так як ця похибка входить в похибку масштабного коефіцієнта, повторюваність зміщення нуля і масштабного коефіцієнта від включення до включення, чутливість до лінійного прискорення, магнітного та електромагнітного полів та ін.

Процес паспортизації схожий на процес калібрування. Різниця полягає в тому, що після проведення випробувань для паспортизації параметрів КВГ не потрібно проводити оцінку коефіцієнтів корекції і введення їх в процесор КВГ.

Приклад паспорта приладу КВГ представлений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри КВГ, що паспортизуються

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1	2	3
Нормальні умови		
Діапазон вимірювання кутових швидкостей	град/с	$\pm 200$
Полоса пропускання	Гц	100
Повторюваність МК від вкл. до вкл. ( $1\sigma$ )	%	0,1
Нелінійність МК( $1\sigma$ )	%	0,05
Стабільність зміщення нуля в пуску	град/год	0,3
(мінімум варіації Аллана)	град/год	2,4
Повторюваність зміщення нуля від вкл. до вкл. ( $1\sigma$ )	град/ $\sqrt{\text{год}}$	0,01
Випадковий ухід ( $1\sigma$ )	(град/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$	0,00045
В температурному діапазоні з середньою швидкістю зміни температури $1^\circ\text{C}/\text{хв}$		
Стабільність зміщення нуля в пуску (мінімум варіації Аллана)	град/год	1
Температурна чутливість зміщення нуля	(град/год)/ $^\circ\text{C}$	4,2
Температурна чутливість МК	%/ $^\circ\text{C}$	0,01
Випадковий ухід ( $1\sigma$ )	град/ $\sqrt{\text{год}}$	0,03

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
<b>Фізичні параметри</b>		
Пусковой струм споживання	А	0,5
Струм споживання приладу	А	0,15
Тривалість пускового режиму	мс	20
Потужність споживання (норм.умови)	Вт	2,5
Потужність споживання в пусковому режимі (норм.умови)	Вт	7,5
Габаритні розміри ЧЕ (Д×Ш×В)	мм	72×60×62
Маса	г	400

#### **4.5. Випробування КВГ на чутливість зміщення нуля до зовнішніх збурень**

Гіроскопи, як правило, використовуються на пересувних об'єктах, які знаходяться під впливом зовнішніх механічних збурень – вібрацій та ударів. При цьому, параметри гіроскопів повинні знаходитися в межах необхідних точностей. В підрозділі наводяться результати випробувань зміщення нуля КВГ з металевим циліндричним резонатором на чутливість до вібраційних і ударних впливів.

##### **4.5.1. Випробування КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації**

При проведенні випробувань КВГ встановлювався на платформу вібраційного стенду так, що вібрація діяла уздовж осі чутливості КВГ. Параметри вібрації були наступні: амплітуда синусоїдальних вібрацій змінювалася в діапазоні [1–4] g, а частота змінювалася (для кожної фіксованої амплітуди) в діапазоні [10–120] Гц. Всі вимірювання проводилися з частотою знімання інформації з КВГ рівній 600 Гц.

Метою випробувань було вимірювання чутливості зміщення нуля КВГ до вібраційних впливів. Для визначення зміни зміщення нуля КВГ в процесі вібрацій проводилося усереднення показань КВГ під час вібрацій для кожної

амплітуди вібрації і порівняння отриманих значень із значенням зсуву нуля до початку вібрацій [20, 21].

Дані вимірювань представлені на рис.4.16.

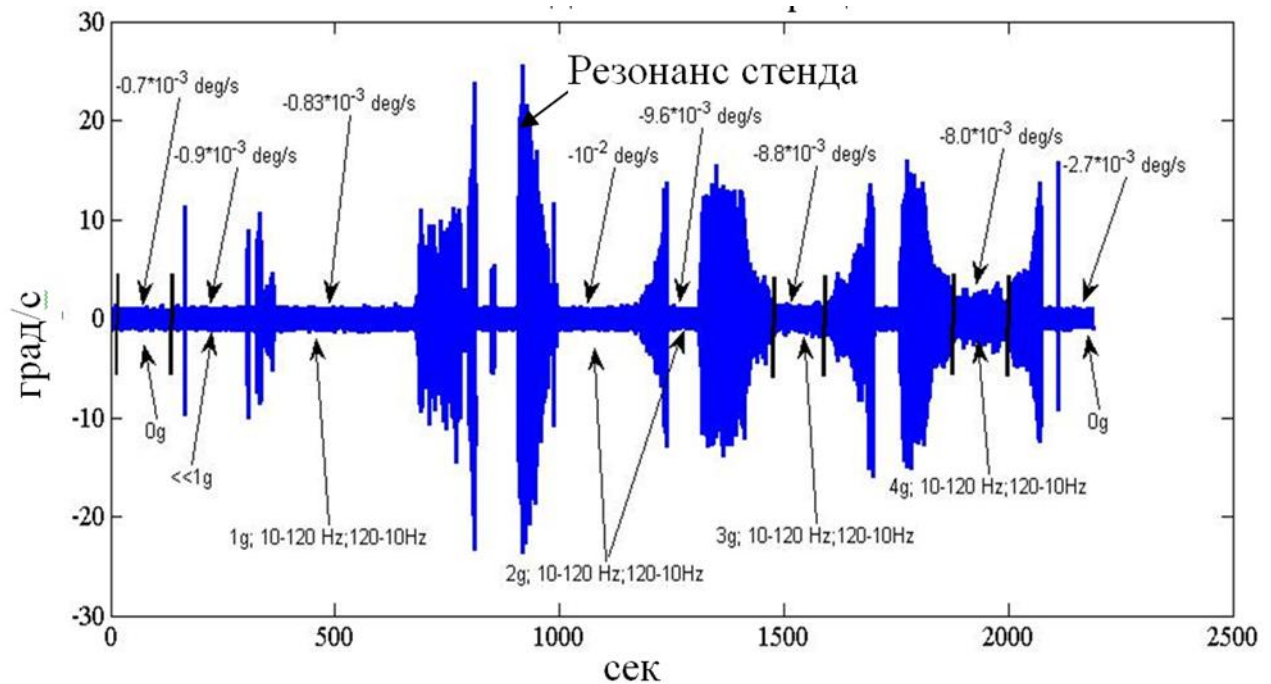


Рис.4.16. Дані випробувань КВГ на вплив вібрацій

На рис.4.17 представлено дані впливу на КВГ вібрації амплітудою 1g в діапазоні [10–120] Гц.

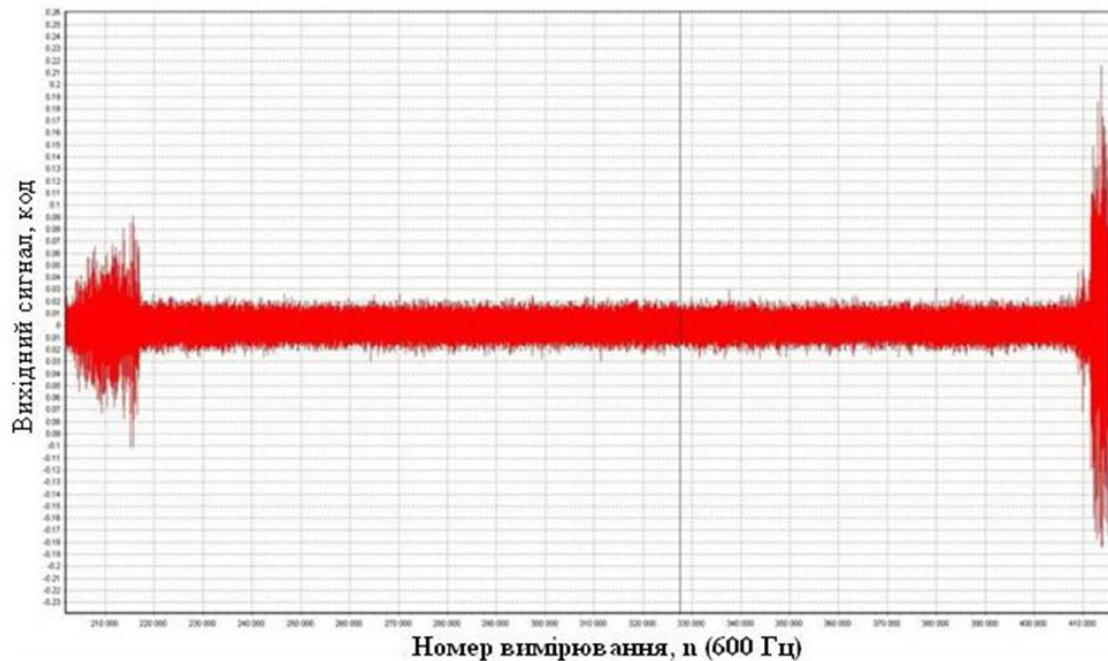


Рис.4.17. Вихідний сигнал КВГ при дії вібрації амплітудою 1g в діапазоні [10–120] Гц

На рис.4.18 представлено дані впливу на КВГ вібрації амплітудою  $2g$  в діапазоні  $[10-120]$  Гц.

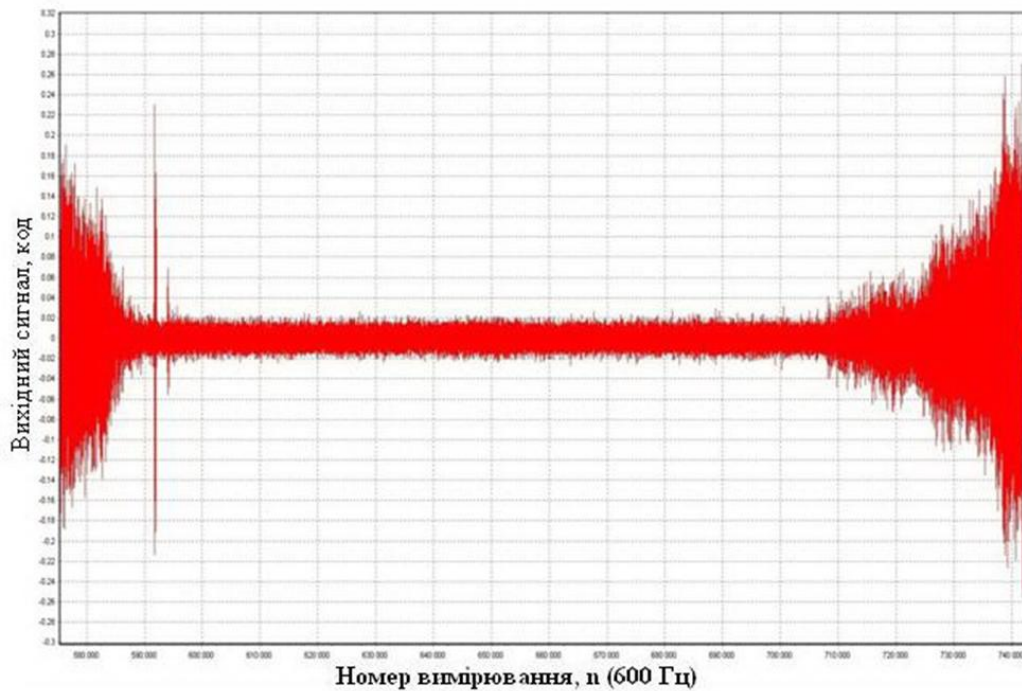


Рис.4.18. Вихідний сигнал КВГ при дії вібрації амплітудою  $2g$  в діапазоні  $[10-120]$  Гц

На рис.Рис.4.19 представлено дані впливу на КВГ вібрації амплітудою  $3g$  в діапазоні  $[10-120]$  Гц.

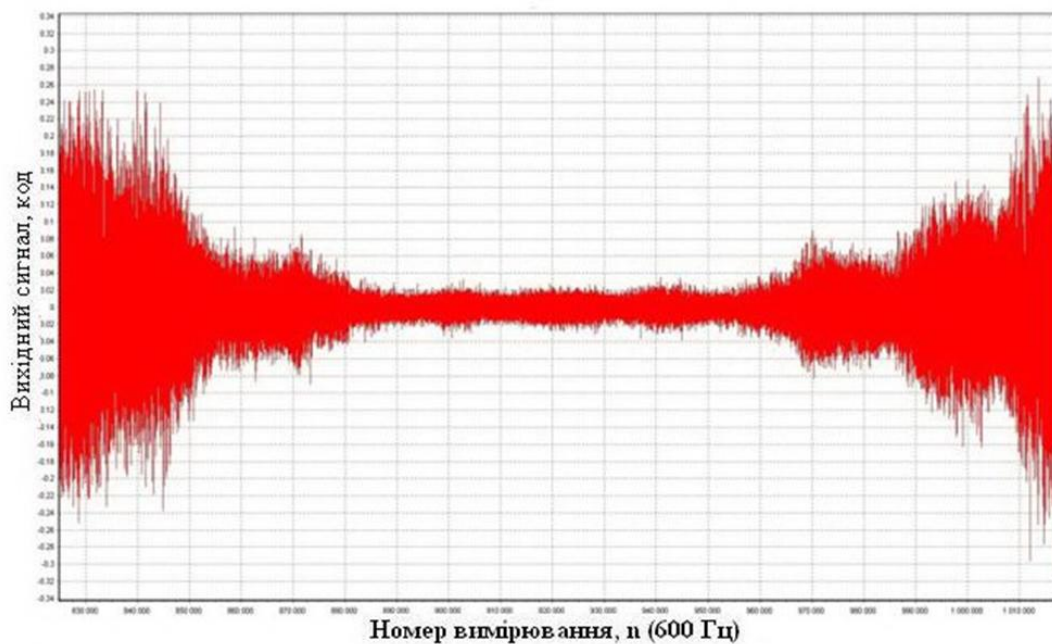


Рис.4.19. Вихідний сигнал КВГ при дії вібрації амплітудою  $3g$  в діапазоні  $[10-120]$  Гц

На рис.4.20 представлено дані впливу на КВГ вібрації амплітудою 4g в діапазоні [10–120] Гц.

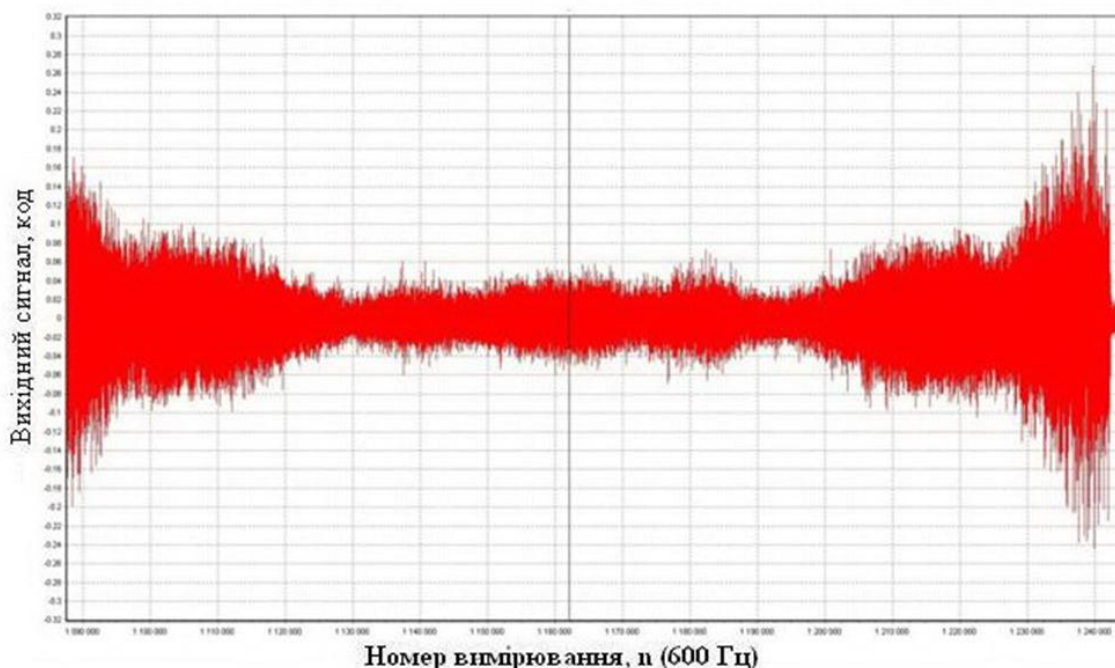


Рис.4.20. Вихідний сигнал КВГ при дії вібрації амплітудою 4g в діапазоні [10–120] Гц

Як видно з рис.4.16–4.20 максимальна різниця зміщення нуля КВГ при вібраціях від 1g до 4g не змінюється більше ніж, на 0,01 град/с, а коливання зсуву нуля при дії вібрацій з різною амплітудою знаходяться в межах статистичної невизначеності обчислення середнього значення.

Істотне зростання шумової компоненти вихідного сигналу КВГ обумовлено резонансом стенду на частотах до 40 – 50 Гц. Один з таких резонансів показаний стрілкою на рис.4.16.

Таким чином, приходимо до висновку, що чутливість зміщення нуля КВГ до вібраційних збурень у діапазоні частот до 120 Гц є не більше  $0,01 \text{ град/с} / 4g = 0,0025 \text{ град/с/g}$ .

#### 4.5.2. Випробування КВГ на чутливість зміщення нуля до ударів

Випробування проводилися з метою визначення чутливості зміщення нуля КВГ до ударів [22 – 24]. При цьому, КВГ встановлювався на платформу



ударного стенда так, що його вісь чутливості була перпендикулярна платформі, а прискорення удару діяло уздовж осі чутливості.

Удари проводилися амплітудою 100g тривалістю 2 мс. Один одиночний удар і один багаторазовий удар (4 удари з інтервалом 1 сек).

Для визначення зміщення нуля КВГ до і після удару проводилося усереднення показань КВГ в інтервалах часу, коли рух стенду був відсутній. Ці ділянки показані стрілками на рис.4.21 і 4.22.

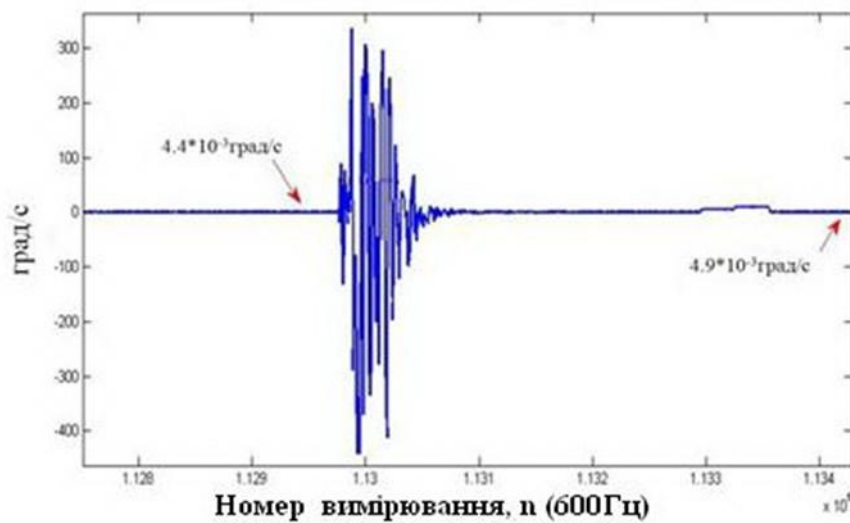


Рис.4.21. Вихідний сигнал КВГ при першому одиночному ударі 100g

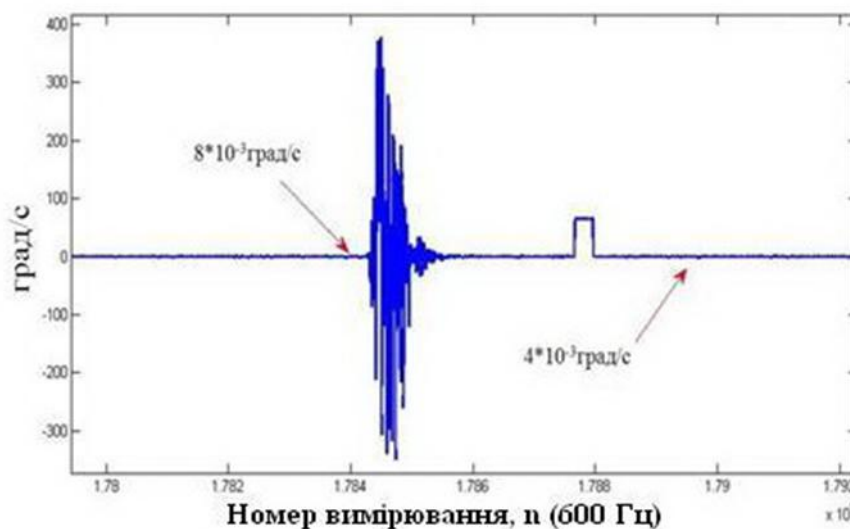


Рис.4.22. Вихідний сигнал КВГ при другому одиночному ударі 100g

Зміна зміщення нуля КВГ до і після закінчення удару дорівнює  $5 \times 10^{-3} \text{ град/с}$  і  $4 \times 10^{-3} \text{ град/с}$  відповідно, що є допустимою нормою, тобто

можна зробити висновок, що при ударі зміна зсуву нуля, обумовленого дією ударного прискорення, не виявлено.

На рис.4.23 показаний графік вихідного сигналу КВГ із зазначенням значень зсуву нуля при багаторазовому (4-х кратному) ударі 100g, тривалістю 2 мс, що слідують один за одним через інтервал часу приблизно рівний 1 сек.

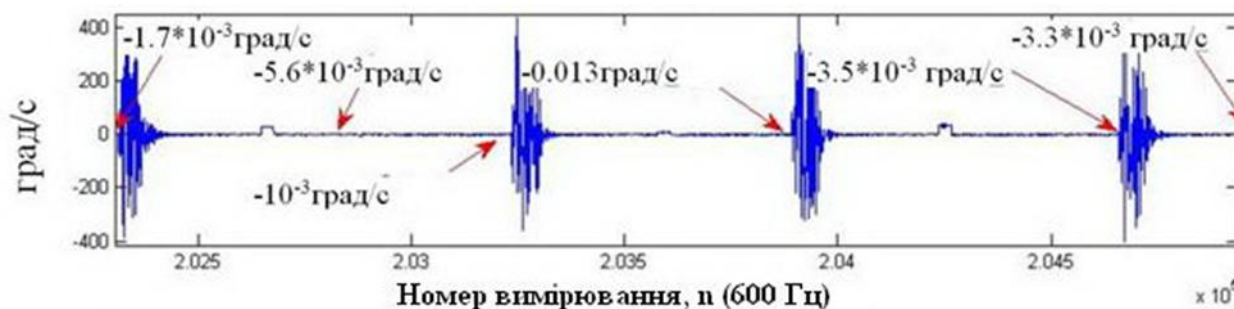


Рис.4.23. Вихідний сигнал КВГ при багаторазовому ударі 100g

Зміна зсуву нуля КВГ перед 4-х кратним ударом і після нього становить  $1,6 \times 10^{-3}$  град/с, що не перевищує норму (норма = 0,01 град/с). Різниця значень зсуву нуля між ударами також не перевищує норму.

При 4-х кратному ударі зміна зсуву нуля, обумовлене дією ударного прискорення в 100g, тривалістю 2 мс, не виявлено. Таким чином, можна стверджувати, що чутливість зміщення нуля КВГ з металевим циліндричним резонатором до удару в діапазоні ударних прискорень до 100g тривалістю 2мс, не перевищує  $\frac{0,01}{100} = 10^{-4}$  град/с/g.

Введення до конструкції КВГ додаткового демпфера дозволяє знизити амплітуду вихідного сигналу при дії перевантажень та зменшити зміщення нуля та підвищити точність вимірювання [25].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Розглянуто алгоритми корекції зміщення нуля, масштабного коефіцієнта, і інших специфічних параметрів КВГ, що поліпшують його точність при роботі в широкому діапазоні температур. Розглянуто варіанти каліброваних процедур, що скорочують час випробувань та поліпшують точність калібрування.

Розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди, що впливають на зміщення нуля КВГ. Визначення



корекційних коефіцієнтів та введення їх в алгоритм роботи дозволило зменшити середнє значення зміщення нуля в 3 рази, а варіацію дрейфу зміщення нуля в 4,5 рази.

Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Визначення корекційних параметрів полінома та введення їх в алгоритм роботи КВГ дозволило зменшити середньоквадратичну похибку компенсації сигналу до 0,038%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

Розроблено температурну модель масштабного коефіцієнта та запропоновано новий метод компенсації його температурної похибки. Визначення корекційних параметрів полінома методом множинної регресії та введення їх у алгоритм роботи КВГ дозволило скоротити середньоквадратичну похибку компенсації МК до 0,057%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

Розроблено методики паспортизації основних параметрів КВГ: діапазон вимірювання кутових швидкостей, повторюваність МК, не лінійність МК, стабільність зміщення нуля, повторюваність зміщення нуля від включення до включення, випадковий ухід як в нормальних умовах, так і в діапазоні температур.

Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації. Чутливість зміщення нуля КВГ до вібраційних збурень становить 0,0025 град/с/g.

Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до ударів. Чутливість зміщення нуля до ударних прискорень 100g тривалістю 2 мс, не перевищує  $10^{-4}$  град/с/g.

#### **ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 4**

1. Чіковані В.В. Дослідження впливу зовнішніх вібрацій та ударів на працездатність і точність коріолісового вібраційного гіроскопа. Результати моделювання /В.В. Чіковані, Ю.А. Яценко, Т.О. Бакалор, І.Т. Міколишин // VI міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація,

керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірка доповідей. — НТУУ «КПІ», 2007. — С.211.

2. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431™. — 2004. — P.69.

3. Петренко О.В. Temperature correction of the signal phases in a vibratory gyroscope /О.В. Петренко // Polish journal of science. — Warszawa, Poland, 2019. — №15(1). — PP.30-34.

4. Lynch D. Vibratory gyro analysis by the method of averaging /D. Lynch // Proc. 2nd St. Petersburg conf. on gyroscopic technology and navigation. — 24-25 May, St. Petersburg, Russia, 1995. — PP.26-34.

5. IEEE Standard for inertial sensor terminology IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.528™. — 2001. — P.20.

6. Weinberg H. Calibration iMEMS gyroscopes /H. Weinberg // AN-1049 Application note. — Analog devices Inc.. — 2009.

7. Chikovani V. V. Bias compensation in differential Coriolis vibratory gyro /V.V. Chikovani, H.V. Tsiruk // Electronics and control systems. — 2013. — №4(37). — PP.99-103.

8. Chikovani V. V. Modeling temperature errors in Coriolis vibratory gyroscopes /V. Apostolyuk, V. Chikovani // Електроніка та системи управління. — 2012. — №4(34). — P.155-158.

9. Петренко О.В. Багатопараметрична модель дрейфу вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // Вісник інженерної академії України. — Київ, 2016. — №2. — С.93-97.

10. Chikovani V. V. Study of thermal drift for metallic cylindrical Coriolis vibratory gyroscope /Yu.A. Yatsenko, V.V. Chikovani, A.N. Yanchuk // Integrated navigation systems:10-th int. conf.. — 26-28 May, ЦНИИ «Электронприбор», 2003. — С.337-339.

11. Патент 7120548 (USA Patent) МПК G01 C 19/56. Method of calibrating bias drift with temperature for a vibrating structure gyroscope / Alan R. Malvern, Richard H.W. Reilly. — №0227098.1; заявл.20.11.2002; опубл.3.06.2004.

12. Патент WO2013055253 A1 Способ калибровки коэффициента масштабирования гиро датчика угловой скорости или осесимметричного вибрационного гироскопа / И.М. Окон. — №PCT/RU/2011/000806; опубл.18.04.2013.

13. Патент 7707885 B2 (USA Patent) МПК G01 C 19/56. Method for temperature compensated gyrometric measurement and gyrometric device using same / Jose Betia; опубл.04.04.2010.

14. Патент 2400707 C1 (Патент РФ) МПК G01 C 19/56, G01P 21/00. Способ калибровки масштабного коэффициента осесимметричного вибрационного гиро датчика угловой скорости / Жан Руа Ален, Рено Ален, Карон Жан-Мишель. — №PCTWO 2008/0902; опубл.27.09.2010.

15. Chikovani V.V. Vibratory gyroscope scale factor multi-parametric calibration /V.V. Chikovani, О.В. Петренко // IEEE 3rd International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control(MSNMC)». — 14-17 Oct., NAU, Kyiv, 2014. — PP.129-131.

16. Патент на винахід 111408 Україна, МПК G01C 19/56. Спосіб компенсації температурної погрешності масштабногo коефіцієнта вібраційного гіроскопа / Маляров С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В.; заявник та власник Маляров С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В.№a201409707; заявл.04.09.2014; опубл.25.04.2016, Бюл. №8.

17. Петренко О.В. Температурна модель масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015». — 28-29 квітня, Київ, 2015. — С.39.67-39.71.

18. Патент №7120748 (USA Patent) МПК G06F 12/126, G06F 12/00. Method of Calibrating Bias DriftWith Temperature for a Vibrating Structure Gyroscope /Allan R. Malvern, Richard H.W. Reilly; заявл. 04.09.2003; опубл. 10.10.2006.

19. Азарсков В.М. Розробка методик корекції та паспортизації параметрів коріолісового вібраційного гіроскопа та дослідження режимів його роботи : звіт про НДР № 796-X13 / НАУ; керівн.: Чіковані В.В.; викон.: В.М. Азарсков, В.В. Чіковані. 2013. — 128 С.

20. Петренко А.В. Результаты испытаний вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность смещения нуля к внешним вибрациям и ударам / А.В. Петренко // Восьма міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015)». — 18-19 травня, НАУ, Київ, 2015. — С.300-302.

21. Chikovani V. V. Shock and vibration sensitivity test results for metallic resonator CVG / V.V. Chikovani, Yu.A. Yatsenko, I. Mikolishin // Integrated navigation systems: 16-th int. conf.. — 25-27 May, ЦНИИ «Электронприбор», 2009. — С.88-92.

22. Chikovani V. V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of coriolis vibratory gyroscope resonator / V. V. Chikovani // Electronics and control systems. — 2012. — №4. — P.56-63.

23. Chikovani V.V. Shock resistance of differential type ring-like resonator vibratory gyroscope / V.V. Chikovani, H.V. Tsiрук // Electronics and control systems. — 2014. — №4(42). — PP.79-83.

24. Chikovani V. V. Influence of external shocks and internal noises on the resonant frequency tracking system in Coriolis vibratory gyroscope / V. V. Chikovani // Військово-технічний збірник. — 2013. — №1. — С.96-101.

25. Petrenko O.V. Damper for vibratory gyroscope that is used in rigid conditions with mechanical impact / O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The seventh world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies». — 19-21 Sept., НАУ, Kyiv, 2016. — PP.3.3.51-3.3.55.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено поставлену задачу обґрунтування та розробки конструкції чутливого елементу вібраційного гіроскопа, що працює в режимі вимірювання кутової швидкості і забезпечує високу чутливість при вимірюванні малих кутових швидкостей, широкий діапазон вимірювання кутових швидкостей та достатньо високу стійкість до вібро-ударних прискорень, забезпечено корекцію зміщення нуля, масштабного коефіцієнту та мінімізовано вплив сигналу квадратури на сигнал кутової швидкості при зміні температури.

Отримано наступні нові результати:

1. Проведено порівняння двох конструкцій металевих циліндричних резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру. Шляхом розрахунків і комп'ютерного моделювання обґрунтовані переваги другого варіанту конструкції над першим у частині вібро-ударостійкості; проведено аналіз отворів різної геометрії. Виявлено їх вплив на резонансні частоти коливань циліндричного резонатору. Вироблено рекомендації щодо геометрії резонатора та його елементів; удосконалено конструкцію основи, на яку встановлюється новий розроблений резонатор з отворами на твірній поверхні циліндру; експериментально обґрунтовано вибір п'єзоелектродів, що використовуються для збудження коливань і вимірювання сигналів металевого резонатору.

2. Розроблено методикута обладнання для робочого місця безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення; проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі і похибок позиціонування п'єзоелектродів на зміщення нуля та масштабний коефіцієнт КВГ; розроблено конструкцію приладдя для приклеювання п'єзоелектродів до резонатора нової конструкції; визначено допустимі параметри резонаторів: різночастотності  $\Delta F \leq 0,01$  Гц та кут орієнтації хвилі  $\delta\varphi \leq 2^\circ$ .

3. Представлено теоретичні основи динамічного балансування металевого резонатора для зменшення параметрів різночастотності та кута орієнтації хвилі; розроблено методику балансування металевого резонатора та визначення дисбалансу мас по четвертій формі дефекту; розроблено робоче місце для балансування резонатора, проведено балансування дослідних зразків генераторів коливань та визначено їх основні характеристики.

4. Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елементу до монтажно́ї поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка ( $\alpha = 0,1^\circ$ ,  $\beta = 0,12^\circ$ ).

5. Розроблено базову математичну модель роботи КВГ, як датчика кутової швидкості зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силою Коріоліса. Розроблено блок-схему управління КВГ-ДКШ та описано кожен з його ланок.

6. Розроблено математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. Кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки. Проведено випробування чутливості дослідного зразка КВГ-ДКШ-Д до уданих навантажень вздовж осі чутливості. Дослід показав, що пікові значення каналу  $(X - Y)/2$  менші пікових значень  $X$  чи  $Y$  в 39 раз при ударах 5g, в 2 рази менші при ударах 20g та в 2,5 рази менші при ударах 100g.

7. Розглянуто математичну модель інтегруючого режиму роботи КВГ, коли сила Коріоліса не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. Побудовано блок-схему та Matlab-Simulink-модель КВГ-І та проаналізована робота КВГ-І при швидкості обертання 90 град/с.

8. Розроблена повна нелінійна MatlabSimulink-модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи: КВГ-ДКШ, КВГ-ДКШ-Д, КВГ-І. Ця схема реалізує багаторежимний ДКШ з можливістю автоматичного перемикання з режиму на режим.

9. Розглянуто алгоритми корекції зміщення нуля, масштабного коефіцієнта, і інших специфічних параметрів КВГ, що поліпшують його точність при роботі в широкому діапазоні температур. Розглянуто варіанти каліброваних процедур, що скорочують час випробувань та поліпшують точність калібрування.

10. Розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди, що впливають на зміщення нуля КВГ. Визначення корекційних коефіцієнтів та введення їх в алгоритм роботи дозволило зменшити середнє значення зміщення нуля в 3 рази, а варіацію дрейфу зміщення нуля в 4,5 рази.

11. Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Визначення корекційних параметрів полінома та введення їх в алгоритм роботи КВГ дозволило зменшити середньоквадратичну похибку компенсації сигналу до 0,038%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

12. Розроблено температурну модель масштабного коефіцієнта та запропоновано новий метод компенсації його температурної похибки. Визначення корекційних параметрів полінома методом множинної регресії та введення їх у алгоритм роботи КВГ дозволило скоротити середньоквадратичну похибку компенсації МК до 0,057%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

13. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації. Чутливість зміщення нуля КВГ до вібраційних збурень становить 0,0025 град/с/g.

14. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до ударів. Чутливість зміщення нуля до ударних прискорень 100g тривалістю 2 мс, не перевищує  $10^{-4}$  град/с/g.

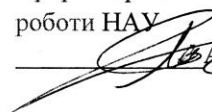
# ДОДАТКИ



## Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

**ПОГОДЖЕНО**


Проректора з навчальної  
роботи НАУ

 А.І. Гудманя

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректора НАУ



 В.М. Ісаєнко

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи

Комісія у складі: голова комісії – завідувач кафедри аерокосмічних систем управління, д.т.н, професор Азарсков В.М. та членів комісії: професор кафедри аерокосмічних систем управління, д.т.н., доцент Чіковані В.В., професор кафедри аерокосмічних систем управління, д.т.н., професор Сущенко О.А. констатує, що результати дисертаційної роботи пошукача Петренка Олексія Володимировича впроваджені у навчальний процес Національного авіаційного університету на кафедрі аерокосмічних систем управління, а саме:

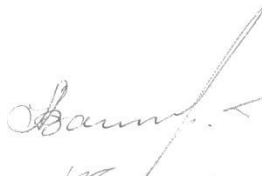
Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, алгоритми, програми, ДСТ, технологічні вимоги, інше)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний, інший)
1	2
1. Повна нелінійна модель КВГ, працюючого в режимі виміру кутової швидкості	1. Дає можливість досліджувати вплив різних зовнішніх діючих факторів на вихідний сигнал КВГ і оцінювати його точність. Також, розроблена модель дає можливість задавати внутрішні динамічні параметри КВГ, такі як добротність, резонансна частота, різнодобротність, різночастотність і їх зміни в часі.
2. Методика балансування металевого резонатора	2. Дана методика дозволяє підвищити точність проведення динамічного балансування металевого резонатора для компенсації похибок при його виготовленні.

1	2
3. Метод компенсації температурної похибки масштабного коефіцієнта КВГ	3. Запропонований метод підвищує точність компенсації температурної похибки масштабного коефіцієнта. Для визначення температурної залежності масштабного коефіцієнта від сигналів, що додатково вимірюється використовується поліноміальна модель, а для визначення калібрувальних коефіцієнтів – метод множинної регресії

Результати дисертаційної роботи Петренка О.В. за темою «Удосконалення методів підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором» впроваджені у навчальний процес кафедри аерокосмічних систем управління:

- використовуються у курсі лекцій з дисципліни «Основи технологій виготовлення пристроїв БСУ» у галузі 15. «Автоматизація та приладобудування» зі спеціальністю 151. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».
- застосовуються в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності 151. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Голова комісії:

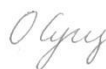


В.М. Азарсков

Члени комісії:



В.В. Чіковані



О.А. Сущенко

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»  
The State Concern UKROBORONPROM

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
“НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ  
ОБ’ЄДНАННЯ  
“КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ”



PUBLIC JOINT STOCK COMPANY  
“RESEARCH-AND-PRODUCTION  
ASSOCIATION  
“KYIV AUTOMATICS PLANT”

вул. Старокиївська, 10, м. Київ, 04116 Україна  
Тел./факс: +38044-236-62-75  
http://www.kza.com.ua E-mail: kza@kza.com.ua

10 Starokyivska str., Kyiv, 04116, Ukraine  
Tel/fax: +38044-236-62-75  
http://www.kza.com.ua E-mail: kza@kza.com.ua

вих. № \_\_\_\_\_

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. Голови Правління

В.Г.Цірук

2019 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів дисертаційної роботи**

Ми, що нижче підписалися, головний метролог Малахов В.В., начальник конструкторсько-технічного управління Возняковський А.О., секретар науково-технічної ради Мірошник С.В. склали дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи здобувача Петренка Олексія Володимировича впроваджені у практику контролю, метрологічної атестації та виробництва вібраційних датчиків кутової швидкості з циліндричним металевим резонатором на ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».

У роботі вирішені питання зменшення впливу дестабілізуючих факторів, що діють на датчики кутової швидкості під час роботи в складі стабілізатора озброєння. Запропоновано методику перевірку основних параметрів резонатора акустичним методом, балансування резонатора у складі генератора коливань. Розроблено методики температурної корекції фаз сигналів, багатопараметричні моделі дрейфу, масштабного коефіцієнту та методи їх корекції.

Використання результатів кандидатської роботи Петренка О.В. дало змогу збільшити точність вимірювання кутової швидкості та покращити параметри

приладу, що виготовляється підприємством та входить до складу складних вимірювальних комплексів та систем стабілізації.

Комісія підтверджує значний теоретичний та практичний внесок Петренка О.В. у розробку методів підвищення точності датчиків кутової швидкості та підтверджує практичний інтерес результатів роботи для фахівців ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».

Взаємних фінансових претензій організації не мають.

Головний метролог  
Начальник КТУ  
Секретар НТР



В.В. Малахов  
А.О. Возняковський  
С.В. Мірошник

**Матеріали патенту на винахід «Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа»**





УКРАЇНА

(19) UA (11) 111408 (13) C2  
(51) МПК  
G01C 19/56 (2012.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2014 09707	(72) Винахідник(и):	Малеров Сергій Прокопович (UA), Цірух Віктор Григорович (UA), Чіковані Валерій Валеріанович (UA), Петренко Олексій Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки:	04.09.2014	(73) Власник(и):	Малеров Сергій Прокопович, вул. Тимошенка, 15-т, кв. 187, м. Київ, 04212 (UA), Цірух Віктор Григорович, вул. П. Григоренка, 3-а, кв. 164, м. Київ, 02068 (UA), Чіковані Валерій Валеріанович, Теоретичний вул. 9, кв. 28, м. Київ, 01042 (UA), Петренко Олексій Володимирович, вул. Дружби, 8, кв. 3, м. Фастів, Київська обл., 08500 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	25.04.2016	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	RU 2400707 C1, 27.09.2010 Harvey Weinberg Calibration (MEMS gyroscopes): AN-1049 Application note. – Analog devices Inc., 2009 http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1049.pdf US 7707865 B2, 04.09.2010 WO 201305523 A1, 18.04.2013 EP 0482739 A2, 01.07.1992 EPITAXIALLY-ENCAPSULATED POLYSILICON DISK RESONATOR GYROSCOPE, 29.10.2013 http://www.archive.org/web/20131020091106/http://www.zhinst.com/docs/publications/Horley_2012_Disk_Resonator-Gyro.pdf
(41) Публікація відомостей про заявку:	10.03.2016, Бюл.№ 5		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	25.04.2016, Бюл.№ 8		

(54) СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОГРІШНОСТІ МАСШТАБНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВІБРАЦІЙНОГО ГРОСКОПА

(57) Реферат:

Винахід належить до гіроскопів. Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа полягає в тому, що вимірюють вихідний сигнал гіроскопа, що відповідає зважній постійній кутовій швидкості і температурі гіроскопа у не менше, ніж двох фіксованих значеннях температури, обчислені калібрувальних значень коефіцієнтів температурної моделі і компенсації температурної погрішності з використанням обчислених коефіцієнтів. Додатково вимірюють сигнали частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадрати при безперервній зміні температури в робочому діапазоні температури, обчислюють додаткові калібрувальні значення коефіцієнтів моделі, які відповідають додатковим вимірюваним сигналам і доповнюють компенсацію температурної погрішності масштабного

UA 111408 C2

UA 111408 C2

Винахід належить до гіроскопів, зокрема до способу компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа в робочому діапазоні температур шляхом визначення калібрувальних коефіцієнтів за результатами випробувань переважно на заводі виробнику.

Відомі способи калібрування масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа [1, 2, 3], в яких спочатку визначають залежність коефіцієнта підсилення каналу збудження від масштабного коефіцієнта гіроскопа можливо у заводських умовах як пропонується у [3], а потім по вимірах коефіцієнта підсилення в умовах експлуатації обчислюють масштабний коефіцієнт гіроскопа, використовуючи пропорцію. Головний недолік цих технічних рішень-аналогів є те, що при зміні температури виникає градієнт температури, при яких не виконуються пропорційні залежності, а виникає нелінійність, що призводить до зростання погрішності калібрування і, відповідно, погрішності компенсації МК.

Найбільш близьким по технічній суті до способу, що заявляється, є спосіб калібрування масштабного коефіцієнта, описаний у джерелі [4] (додається до матеріалів заявки), який полягає в тому, що вимірюється вихідний сигнал гіроскопа, що відповідає зважній постійній кутовій швидкості, і температурі гіроскопа у не менше, ніж двох фіксованих значеннях температури, обчислені калібрувальних значень коефіцієнтів температурної моделі і компенсації температурної погрішності з використанням обчислених коефіцієнтів.

Недоліки прототипу такі, що виміри здійснюються на фіксованих температурах чутливого елемента. Тобто треба щоб зовнішня температура була встановлена на першому значенні, наприклад, -40 °C, почекавши встановлення цієї температури усередині гіроскопа і його чутливого елемента, який знаходиться, як правило, у вакуумі, і здійснити виміри. Час встановлення температури усередині чутливого елемента, як правило, не менше 1 години. В плані цього часу виміри не здійснюються, оскільки вимірювані сигнали змінюються і їх виміри приводять до погрішностей обчислення коефіцієнтів моделі. Такий час чекання встановлення температури треба врахувати на кожній фіксованій температурі. Якщо прийняти лінійну модель залежності масштабного коефіцієнта від температури, то необхідно визначити два коефіцієнти моделі, до чого потрібні виміри на двох фіксованих температурах ( $T_0$  і  $T_1$ ). При цьому втрачається дві години на встановлення температури. Для поліноміальної моделі другого порядку (параболи) знадобиться три фіксовані температури (додається до матеріалів заявки) (додається, що  $T_0$ ,  $T_1$  і  $T_2$  для формули (10, 11) опису прототипу [4], що додається), і відповідно, втрачається 3 години і так далі.

Крім того, спосіб, описаний в прототипі не враховує зміни масштабного коефіцієнта під час змін температури, коли діють температурні градієнти. Це також призводить до зростання погрішностей компенсації, бо в практичних умовах експлуатації, якщо спеціально не стабілізувати температуру, діятимуть температурні градієнти.

Також слід зазначити, що масштабний коефіцієнт залежить не тільки від температури, але і від резонансної частоти вібрації та інших сигналів, наприклад управління вібраційною хвилею. Крім того, датчик температури, який, як правило, встановлюють на електронній платі, показує температуру плати в точці його установки, а резонансна частота є функція просторового розподілу температури за об'ємом резонатора, як частини чутливого елемента гіроскопа і зокрема тодішнього опору зміни частоти вібрації. Так само можна сказати про такі важливі сигнали управління вібраційною хвилею як амплітуда збудження і амплітуда квадрати, які особливо істотно впливають на зміну масштабного коефіцієнта при зміні температури, коли виникають градієнти температури. Останнє є наслідком порушення ортогональності фаз взаємних сигналів і сигналу кутової швидкості.

В основу винаходу поставлена задача підвищення точності компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта гіроскопа і зменшення часу калібрування коефіцієнтів моделі за рахунок того, що додатково вимірюються сигнали частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадрати при безперервній зміні температури в робочому діапазоні температури, обчислення додаткових калібрувальних значень коефіцієнтів моделі, які відповідають додатковим вимірюваним сигналам і доповнюють компенсацію температурної погрішності масштабного коефіцієнта.

Крім того, використовується поліноміальна модель температурної залежності масштабного коефіцієнта від сигналів, що додатково вимірюються, а калібрувальні коефіцієнти моделі обчислюються методом множинної регресії.

В спосіб компенсації заявляється зменшення часу калібрування коефіцієнтів моделі забезпечується тим, що не треба чекати стабілізації фіксованої температури. В процесі безперервної зміні температури реєстрація сигналів температури і додаткових сигналів частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадрати забезпечується за достатньо коротий час, наприклад, 1 сек., за який зміна температури не значна і масштабний коефіцієнт гіроскопа є

UA 111408 C2

постійним. Дійсно, нехай швидкість зміни температури дорівнює 3 °C/мин (це тепловий удар), тоді зміна температури за час 1 сек. дорівнюватиме 3/60=0,05 °C. При такій малій зміні температури масштабний коефіцієнт гіроскопа залишиться практично незмінним. При необхідності можна зменшити час реєстрації сигналів до 0,1 с, проте у більшості застосовується 1 с є достатньою.

Підвищення точності температурної компенсації масштабного коефіцієнта гіроскопа забезпечується за рахунок додаткових вимірювань сигналів частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадрати, які забезпечують повніший і точніший опис зміни масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа особливо при зміні температури, враховуючи погрішності, які виникають при розумових оцінках фаз сигналів управління, а також зміни коефіцієнтів підсилення електродів збудження вібрації та зміни інформації про вібрацію.

Додаткові сигнали вводяться в модель масштабного коефіцієнта у вигляді полінома, а для визначення коефіцієнтів полінома використовується метод множинної регресії, який дозволяє отримувати стійкі оцінки коефіцієнтів за наявності шуму у вимірюваних сигналах.

Способи компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта (МК) вібраційного гіроскопа, що заявляються у відомих джерелах інформації не виявлені, що дозволяє вважати їх новими.

Відомі оцінки в своїй сукупності є необхідними і достатніми для досягнення поставленої задачі, в інших відомих технічних рішеннях по компенсації погрішності МК не виявлені, що забезпечує їм відповідність критерію «винахідницький рівень».

Введення у відомий спосіб додаткових сигналів, що вимірюються при безперервній зміні температури, у вигляді поліноміальної моделі, коефіцієнти якої обчислюються методом множинної регресії, дозволяє реалізувати запропонований спосіб компенсації температурної погрішності МК вібраційного гіроскопа, підвищити його точність та зменшити час калібрування коефіцієнтів моделі.

На фіг. 1 зображені графіки вимірів МК вібраційного гіроскопа (верхній графік) на стабільних температурах за способом прототипу і профіль температури (нижній графік), включаючи зміни температури з швидкістю 1 °C/хв.

На фіг. 2 представлені крива 1 вимірів МК гіроскопа кожну секунду за способом, що заявляється і три значення МК (помічені колами), що апроксимуються параболою, обчислені за способом прототипу.

Фіг. 3 показує погрішність компенсації МК у відсотках за способом прототипу в процесі змін температури.

На фіг. 4 представлені крива 1 вимірів МК кожну секунду без інтервалів стабільної температури і крива 2, що є розрахункова крива, отримана по моделі, запропонованій в заявленому способі.

На фіг. 5 представлені погрішність компенсації МК (верхній графік) за запропонованим способом і профіль температури без інтервалів стабільної температури (нижній графік).

Суть способу полягає в наступному.

Вихідний сигнал гіроскопа  $V_{\text{вих}}$  записується наступним виразом:

$$V_{\text{вих}} = MK \cdot \Omega + V_0 \quad (1)$$

де МК є масштабний коефіцієнт,  $\Omega$  є фіксована кутова швидкість, що вимірюється,  $V_0$  є зміщення нуля гіроскопа.

Звідси витікає, що

$$MK = \frac{V_{\text{вих}} - V_0}{\Omega} \quad (2)$$

яко не враховувати другий доданок у правій частині рівняння (2), тобто зміщення нуля, то виникає методична погрішність.

Для гіроскопів грубої точності зміщення нуля, виражене в розмірності кутової швидкості, може досягати 250 град/с=360000 град/хв дорівнює

$$\frac{\Delta MK}{MK} = \frac{250}{360000} = 7 \cdot 10^{-4} = 0,07\% \quad (3)$$

UA 111408 C2

Ця методична погрішність в даному випадку означає, що погрішність компенсації МК може бути тільки близько 0,07 %. Для більшості застосовує гіроскопів грубої точності, наприклад, такі, які є на даний час найбільш відрізняються мікроелектронічних гіроскопів, цілком достатня для більшості застосовує. Якщо треба збільшити нижню границю точності компенсації МК, то при тестуванні гіроскопа слід обертати його зі швидкістю більш ніж 100 град/с, наприклад 200 град/с, 300 град/с і так далі, до максимальної кутової швидкості динамічного діапазону конкретного гіроскопа, що калібрується.

Для гіроскопів середньої та високої точності, у яких динамічний діапазон не більше 100 град/хв, слід спочатку провести калібрування та компенсацію зміщення нуля, а потім калібрування МК.

Після компенсації зміщення нуля до значень 15 град/хв та менше, нижня границя погрішності компенсації МК дорівнює  $15/360000 \times 10^3 = 0,004\%$ . Для подальшого зменшення нижньої границі слід враховувати проекцію кутової швидкості Землі на вісь чутливості гіроскопа. Зазначай, при калібруванні гіроскоп встановлюють на горизонтальній поверхності стіл в термостаті так, що його вісь чутливості лежить у вертикальній площині і гіроскоп виміряє як додаток вертикальну компоненту кутової швидкості обертання Землі, яка на широті  $\phi$  м. Києва, приблизно дорівнює  $15 \sin \phi \approx 11$  град/хв. Це значення треба відняти з показань гіроскопа, зменшуючи методичну погрішність. В цьому випадку нижню границю методичної погрішності компенсації МК можна довести до 0,001 % і менше. Однак на практиці значення 0,004 % задовольняє більшості застосовуваних гіроскопів.

На фіг. 1 представлені результати вимірів МК вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором в діапазоні зовнішніх температур (температури термокамери) [-40;-75]°C при швидкості зміни температури 1 °C/хв і обертанні гіроскопа з кутовою швидкістю 200 град/с за способом прототипу. Вимірювання температури (нижній графік) проводилися датчиком, який розміщувався на електронній платі гіроскопа тому, а-за нагріву плати в процесі роботи гіроскопа інтервал температур усередині гіроскопа змінився на -6-7 °C у бік великих значень, тобто перетворювався в діапазон [-32;-81]°C. Як видно з фіг. 1, щоб виміряти МК гіроскопа у 5 точках різних температур, треба 9,4 години часу. Проте, при використанні способу, що пропонується, який не вимагає стабілізації температури на кожному фіксованому її значенні для виміру МК, знадобилося всього 4,4 години, тобто більш ніж у 2 рази менше часу. Якщо зменшити кількість точок з 5 до 3 (25, -40, 85) °C, як приведено у таблиці 1 опису прототипу [4], то знадобиться 6,8 годин, тоді для запропонованого способу знадобиться 3,8 годин тобто у 1,8 рази менше.

Для порівняння точності компенсації температурної погрішності МК, на фіг. 2 представлені крива 1 вимірів МК гіроскопа кожну секунду за способом, що заявляється і три значення МК (на графіку фіг. 2 помічені колами), що апроксимуються параболою, обчислені за способом прототипу. У цих вимірах кутова швидкість обертання гіроскопа дорівнює 200 град/с, зміщення нуля відмінялося з вимірів гіроскопа і, таким чином, методична погрішність МК не перевищувала 0,004 %. Як видно з фіг. 2 на стабілізованих температурах значення МК порівнюваними способами практично рівні між собою, проте при зміні температури, коли діють градієнти температури, значення МК істотно відрізняються. Якщо бути точнішим, то інформація про МК за способом прототипу в процесі змін температури є відсутня, але при апроксимації трьох точок поліноміальною моделлю (крива 2) другого порядку (параболою), як представлено в описі прототипу, погрішність компенсації буде значною. Ця погрішність у відсотках представлена на графіку фіг. 3 і для негативних температур досягає 2 %, а середньоквадратична погрішність (СКП) в діапазоні температур дорівнює 0,6 %. Крім того, при вимірах за запропонованим способом, на графіку фіг. 2 видно гістерезис МК, який добре відомий фахівцям і проявляється завжди для будь-якого гіроскопа. Гістерезис проявляється через те, що МК змінюється по різному при нагріві і охолодженні на одному і тому ж інтервалі температури. При цьому утворюється гістерезисна петля, яку можна бачити на кривій 1 (фіг. 2) і якої немає на кривій 2 (фіг. 2) що додає погрішність, яку не можливо скорегувати моделлю прототипу.

Способ, що пропонується використовується багатопараметричними моделями компенсації (корекції) температурних погрішностей МК гіроскопа. Як зазначувалося вище, МК гіроскопа залежить не тільки безпосередньо від температури, але і від інших параметрів, таких як резонансна частота, амплітуда збудження, амплітуда квадрати. Безпосередньо температурні параметри, як правило, на електронній платі може характеризувати вклад в погрішність МК від температурних змін коефіцієнта підсилення операційних підсилювачів, ємностей, резисторів та інших електронних компонентів.

Таким чином, приймаючи, наприклад, поліноміальну модель залежності МК від додатково вимірюваних параметрів, запишемо наступну модель:

UA 111408 C2

$$MK_i = MK_0 + \sum_{j=1}^{n_1} (F_j - F_0)^j + \sum_{j=1}^{n_2} (A_j - A_0)^j + \sum_{j=1}^{n_3} (Q_j - Q_0)^j + \sum_{j=1}^{n_4} (T_i - T_0)^j, i=1..n, \quad (4)$$

де  $MK_i$ ,  $F_i$ ,  $A_i$ ,  $Q_i$ ,  $T_i$ ,  $i=1..n$ , – виміри масштабного коефіцієнту, резонансної частоти резонатора, амплитуди збудження, амплитуди квадрантури і температури вібраційного гіроскопа, відповідно, а  $n$  – кількість вимірів;  $F_0$ ,  $A_0$ ,  $Q_0$ ,  $T_0$  – опорні значення відповідних параметрів, які установлюються заздалегідь, деякі з яких можуть дорівнювати нулю;  $MK_0$  – скаляр, що може оцінюватися по результатах вимірів, чи може бути встановлений заздалегідь, наприклад,  $MK_0 = 0$ ;  $\vec{f}$ ,  $\vec{a}$ ,  $\vec{q}$ ,  $\vec{t}$  – вектори коефіцієнтів моделі розмірності  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ , відповідно, які треба оцінювати по результатах вимірів.

Для оцінювання векторів коефіцієнтів моделі і можливі значення  $MK_0$  по результатах вимірів використовуємо метод множинної регресії:

$$\begin{pmatrix} MK_0 \\ \vec{f} \\ \vec{a} \\ \vec{q} \\ \vec{t} \end{pmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T \begin{pmatrix} MK_1 \\ \vdots \\ MK_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де  $M$  – матриця вимірів наступного виду:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \Delta F_1 & \dots & \Delta F_1^{n_1} & \Delta A_1 & \dots & \Delta A_1^{n_2} & \Delta Q_1 & \dots & \Delta Q_1^{n_3} & \Delta T_1 & \dots & \Delta T_1^{n_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta F_n & \dots & \Delta F_n^{n_1} & \Delta A_n & \dots & \Delta A_n^{n_2} & \Delta Q_n & \dots & \Delta Q_n^{n_3} & \Delta T_n & \dots & \Delta T_n^{n_4} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де  $\Delta F_i = F_i - F_0$ ,  $\Delta A_i = A_i - A_0$ ,  $\Delta Q_i = Q_i - Q_0$ ,  $\Delta T_i = T_i - T_0$ ,  $i=1..n$ .  
На фіг. 4 представлені дві криві: крива 1 – виміри МК кожну секунду в діапазоні температур без інтервалів стабільної температури, а крива 2 – розрахункова крива, отримана по моделі (4), коефіцієнти якої були обчислені за методом множинної регресії (формули (5), (6)), для наступних параметрів моделі:  $n_1=n_2=n_3=n_4=3$ ,  $F_0=4997.2$  Гц,  $A_0=Q_0=T_0=0$ ,  $MK_0=0$ ,  $n=13700$  сек. = 3.8 години. Були отримані наступні коефіцієнти моделі:

$\vec{f} = [1.700242615e-003; 2.976025407e-004; 7.122442518e-006]$ ;  
 $\vec{a} = [1.458135322e-001; 1.600507013e-001; 5.998178800e-002]$ ;  
 $\vec{q} = [2.170774963e-003; 8.307483746e-003; 1.263000670e-001]$ ;  
 $\vec{t} = [-1.391987095e-004; -3.999467597e-008; 1.079528890e-008]$ .

Різниця між кривими 1 і 2 фіг. 4 визначає погрешність компенсації МК. Графік цієї різниці, тобто погрешності компенсації МК, від часу представлений на верхньому графіку фіг. 5, а на нижньому графіку цієї фігури представлений температурний профіль без інтервалів стабільної температури. Середньоквадратична погрешність компенсації за запропонованою моделлю в діапазоні температур дорівнює 0.057%, що у 10 разів менше, ніж за способом прототипу (0.6%, бач фіг. 3), і за час, що в 1.8 разів менше, ніж за способом прототипу (6.8 годин проти 3.8 годин). Слід зазначити, що замість поліноміальної моделі зазначеного вище типу, можуть використовуватися моделі, складені з поліномів Лежандра, Лагера, Чебишева та інші, або експоненціальні, логарифмічні та інші, які можуть бути нелінійними відносно оцінюваних параметрів і, в цьому випадку, використовувати метод нелінійної регресії для їх оцінки.

Опис способу, що реалізує конкретну модель, лише поєднані винахід, що заважається і не обмежується тільки ним. Будь-яка модифікація вказаних тут методів і моделей, що забезпечують компенсацію погрешностей масштабного коефіцієнта, зберігаючи суть та зміст цього винаходу як, наприклад, реалізація блоків в аналоговому, цифровому або іншому вигляді, повинна інтерпретуватися як така, яка відповідає суті частини формули винаходу.

4

UA 111408 C2

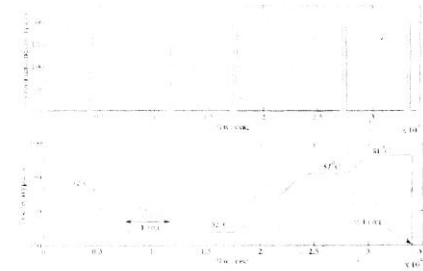
Таким чином, показано досягнення мети винаходу і доведені істотні переваги запропонованого технічного рішення в порівнянні з прототипом.

Джерела інформації:

1. И.М. Оксн "Способ калибровки коэффициента масштабирования гироскопа угловой скорости или осесимметричного вибрационного гироскопа". Номер заявки PCT/RU/2011/000806, дата публ. 18 квіт. 2013, номер публ. WO/2013/05523 A1.
2. Jose Belia "Method for temperature compensated gyrometric measurement and gyrometric device using same". - US Patent № 7707885 B2, G01 C 19/56, 4 May 2010.
3. Жан Руа Ален, Рено Ален, Карон Жан - Мишель "Способ калибровки масштабного коэффициента осесимметричного вибрационного гироскопа угловой скорости". - РФ Патент № 2400707 C1, G01 C 19/56, G 01 P 21/00, опубл. 27.09.2010, публ. PCT WO 2008/0902.
4. Harvey Weinberg "Calibration iMEMS gyroscopes". - AN-1049 Application note. - Analog devices Inc., 2009 ([http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/AN-1049.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1049.pdf))

ФОРМУЛА ВІНАХОДУ

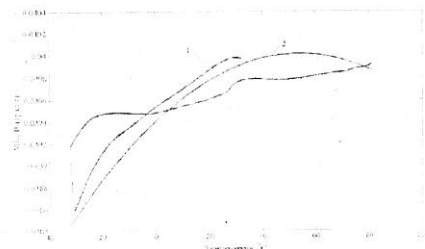
1. Спосіб компенсації температурної погрешності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа, який полягає в тому, що вимірюють вихідний сигнал гіроскопа, що відповідає зваженій постійній кутовій швидкості і температурі гіроскопа у не менше, ніж двох фіксованих значеннях температури, обчислюють калібрувальні значення коефіцієнтів температурної моделі і компенсації температурної погрешності з використанням обчислених коефіцієнтів, який відрізняється тим, що додатково вимірюють сигнали частоти вібрації, амплитуди збудження і амплитуди квадрантури при безперервній зміні температури в робочому діапазоні температур, обчислюють додаткові калібрувальні значення коефіцієнтів моделі, які відповідають додатковим вимірюваним сигналам і доповнюють компенсацію температурної погрешності масштабного коефіцієнта.
2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що використовується поліноміальна модель температурної залежності масштабного коефіцієнта від сигналів, що додатково вимірюються.
3. Спосіб за п. 2, який відрізняється тим, що калібрувальні коефіцієнти моделі обчислюються методом множинної регресії.



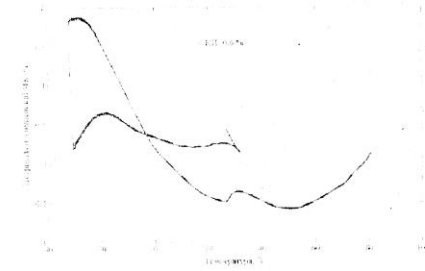
Фіг. 1

5

UA 111408 C2



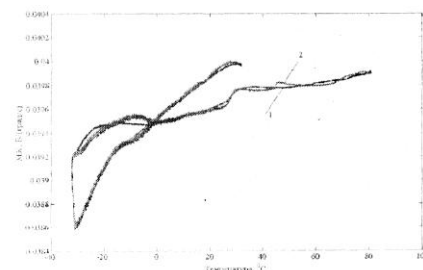
Фіг. 2



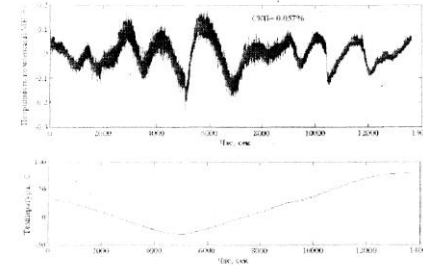
Фіг. 3

6

UA 111408 C2



Фіг. 4



Фіг. 5

Комп'ютерна версія А. Крижанівський

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

7



**Матеріали патенту на корисну модель «Вібраційний гіроскоп з  
компенсацією зміщення нуля»**





(11) 121394	
(19) UA	(51) МПК G01C 19/56 (2012.01)
(21) Номер заявки: u 2017 03313	(72) Винахідники: Петренко Олексій Володимирович, UA, Цірук Ганна Вікторівна, UA, Крамаренко Максим Миколайович, UA
(22) Дата подання заявки: 06.04.2017	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	(73) Власник: ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "НАУКОВО- ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ "КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ", вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116, UA
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 11.12.2017, Бюл. № 23	

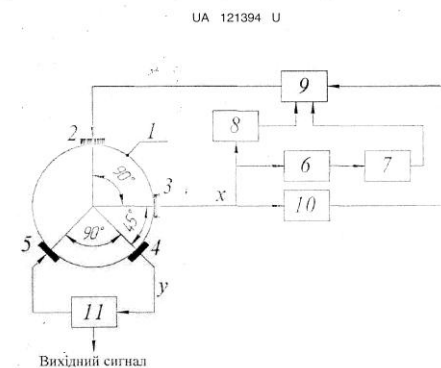
(54) Назва корисної моделі:

ВІБРАЦІЙНИЙ ГІРОСКОП З КОМПЕНСАЦІЮ ЗМІЩЕННЯ НУЛЯ

(57) Формула корисної моделі:

Вібраційний гіроскоп, що містить резонатор з електродами збудження та знімання сигналів, блок збудження первинних коливань, блок формування сигналу, пропорційного кутовій швидкості, який відрізняється тим, що для компенсації зміщення нуля за рахунок вирівнювання різниці коефіцієнтів демпфування коливань і резонансних частот у нього додатково вводиться блок формування швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, вихід якого з'єднаний з входом блока налаштування амплітуди сигналу швидкості відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу, блок налаштування амплітуди сигналу відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу та блок підсилювання сигналу, три входи якого з'єднані з виходами блока налаштування амплітуди сигналу відхилення, швидкості відхилення і блока збудження первинних коливань, а вихід з електродом збудження, а коефіцієнти підсилювання блоків налаштування вибираються так, щоб мінімізувати середнє значення вихідного сигналу гіроскопа.

Сторінка 3 із 4



UA 121394 U

УКРАЇНА		(19) UA	(11) 121394	(13) U
МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ		(51) МПК G01C 19/56 (2012.01)		
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ		(21) Номер заявки: u 2017 03313	(72) Винахідник(и):	
(22) Дата подання заявки: 06.04.2017		(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	(73) Власник(и):	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.12.2017, Бюл. № 23			ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ "КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ", вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116 (UA)	

(54) ВІБРАЦІЙНИЙ ГІРОСКОП З КОМПЕНСАЦІЮ ЗМІЩЕННЯ НУЛЯ

(57) Реферат:

Вібраційний гіроскоп містить резонатор з електродами збудження та знімання сигналів, блок збудження первинних коливань, блок формування сигналу, пропорційного кутовій швидкості. Додатково в гіроскоп введено блок формування швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, вихід якого з'єднаний з входом блока налаштування амплітуди сигналу швидкості відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу, блок налаштування амплітуди сигналу відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу та блок підсилювання сигналу, три входи якого з'єднані з виходами блока налаштування амплітуди сигналу відхилення, швидкості відхилення і блока збудження первинних коливань, а вихід з електродом збудження. Коефіцієнти підсилювання блоків налаштування вибираються так, щоб мінімізувати середнє значення вихідного сигналу гіроскопа.

UA 121394 U

UA 121394 U

Корисна модель належить до вимірювання кутової швидкості і може бути використана в системах стабілізації платформи, розташованих на рухомих об'єктах, а також для виміру орієнтації рухомих об'єктів.

Відомі аналоги вібраційних гіроскопів, патенти США № 7216525, 7586879, 7886598, 8297120 та патент України на корисну модель № 85766. Найближчим аналогом є гіроскоп, описаний у патенті України на корисну модель № 85766, МПК G01C 19/56, зареєстрований у державній реєстрі корисних моделей 25.11.2013 р. В основу найближчого аналога покладено задачу компенсації зміщення нуля за рахунок виявлення осі мінімальної добротності та встановлення напрямку коливань резонатора відносно цієї осі. Недолком найближчого аналога є те, що для більшості резонаторів напрямком осі мінімальної добротності є близько до середньої кутової відстані між сусідніми електродами, тобто під кутом, приблизно рівним  $\alpha \approx 22.5$  градусів до електрода збудження. Однак в цьому випадку зменшується масштабний коефіцієнт гіроскопа в сфері радіа, а разом з ним відношення сигнал/шум, що масштабний коефіцієнт є коефіцієнт посилення корисного сигналу - кутової швидкості. Крім того, зростає квадратична компонента сигналу, яка є погіршенням виміру кутової швидкості і яка є мінімальною, коли вібраційна хвиля має напрямком  $\alpha=0$ , тобто співпадає з електродом збудження.

В основу корисної моделі поставлено задачу компенсації зміщення нуля за рахунок вирівнювання різниці коефіцієнтів демпфування коливань і резонансних частот по каналах збудження первинних коливань та вимірювання кутової швидкості.

Поставлена задача вирішується тим, що в вібраційний гіроскоп, що містить резонатор з електродами збудження та знімання сигналів, блок збудження первинних коливань, блок формування сигналу, пропорційного кутовій швидкості, згідно з корисною моделлю, додатково введено блок формування швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання амплітуди сигналу швидкості відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу, блок налаштування амплітуди сигналу відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсилювання сигналу та блок підсилювання сигналу, три входи якого з'єднані з виходами блока налаштування амплітуди сигналу відхилення, швидкості відхилення і блока збудження первинних коливань, а вихід з електродом збудження.

При цьому зміщення нуля гіроскопа компенсується шляхом налаштування амплітуд сигналу, що пропорційні відхиленню і швидкості відхилення резонатора від його рівноважного положення, а вібраційна хвиля, при цьому, орієнтована по електроду 2 збудження, тобто кут  $\alpha=0$ , масштабний коефіцієнт є максимальний.

Корисна модель пояснюється кресленнями. Модель складається з резонатора (для конкретності опису, кінцевого типу) 1 з електродами збудження 2, знімання сигналів 3, 4, та компенсації 5, блока 6 формування швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, блока 7 налаштування амплітуди сигналу, пропорційного швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, блока 8 налаштування амплітуди сигналу, пропорційного відхиленню резонатора від рівноважного положення, блока 9 підсилювання сигналу, блока 10 збудження первинних коливань та блока 11 формування сигналу, пропорційного кутовій швидкості.

Модель працює наступним чином. Після подачі живлення на гіроскоп блок 10 подає сигнал збудження  $X(t)$  коливань на електрод 2 на резонансній частоті коливань моди збудження  $\omega$ , амплітудою  $A_0$  у вигляді наступного виразу:

$$X(t) = A_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

У цей момент часу коефіцієнти підсилювання к блока 7 та м блока 8 є малими по модулю  $|k| \ll 1, |m| \ll 1$ . Рівняння коливань резонатора за відсутності кутової швидкості і наступний незалежно кількість сигналів з блоків 7 і 8, описуються відомими рівняннями двохмірного маятника:

$$\ddot{x} + \frac{2}{T_x} \dot{x} + \omega_x^2 x = A_0 \cos(\omega t), \quad (2)$$

$$\ddot{y} + \frac{2}{T_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = t_y,$$

де  $x$  - відхилення резонатора від рівноважного положення у процесі вібрації, що є відхиленням резонатора на сигнал збудження  $X(t)$ , тобто вихідний сигнал електроду знімання 3;  
 $y$  - відхилення резонатора від рівноважного положення у процесі вібрації, що є відхиленням резонатора на збудження  $X(t)$  по каналу вимірювання кутової швидкості, тобто вихідний сигнал електроду знімання 4;  $\omega_x, \omega_y$  - резонансні частоти по каналах збудження і вимірювання, відповідно;  $\tau_x, \tau_y$  - постійні часу демпфування коливань по каналах збудження і вимірювання, відповідно.

Для ідеального резонатора, коли  $\omega_x = \omega_y$  і  $\tau_x = \tau_y$ , сила  $F_y = 0$  і як наслідок  $y = 0$ , тобто коливань по вимірювальному каналу відсутні, тобто зміщення нуля відсутнє. Однак помилки виготовлення та неоднорідність матеріалу резонатора приводить до того, що резонансні частоти та постійні часу демпфування по каналах збудження ( $x$ ) і вимірювання ( $y$ ) різні. Як результат виникає сила  $F_y \neq 0$ , що збуджує коливання по вимірювальному каналу, тобто є сигнал з електроду 4 у відсутності кутової швидкості, що приводить до зміщення нуля гіроскопа.

Для компенсації зміщення нуля гіроскопа слід вирішити коефіцієнти демпфування і резонансні частоти по цих двох каналах. Для цього слід подати додаткові сигнали управління, пропорційні відхиленню  $x$  резонатора від рівноважного положення, з коефіцієнтом підсилювання  $k$ , і швидкості відхилення  $\dot{x}$ , з коефіцієнтом підсилювання  $m$ , та налаштувати коефіцієнти підсилювання  $k$  і  $m$  додаткових сигналів для вирівнювання цих двох параметрів резонатора. Ці налаштування виконуються за допомогою блоків 7 і 8, можливо вручну або автоматично. Критерієм налаштування є мінімум середнього значення вихідного сигналу гіроскопа. Слід відмітити, що через присутність шуму у реальних гіроскопах точно налаштувати коефіцієнти  $k$  і  $m$ , щоб отримати  $F_y = 0$  неможливо, тому треба мінімізувати  $F_y$ , тобто зміщення нуля.

Для цього на виході блока 6 формується сигнал  $x$ , а на виході блока 7 формується додатковий сигнал  $m\dot{x}$ . На виході блока 8 формується другий додатковий сигнал  $kx$ . В блоці підсумування 9 додаткові сигнали складаються з сигналом збудження  $A_0 \cos(\omega_x t)$  і суми трьох сигналів подається на електрод 2 збудження.

У разі присутності додаткових сигналів з блоків 7 і 8, рівняння (2) мають наступний вигляд:

$$\ddot{x} + \frac{2}{\tau_x} \dot{x} + \omega_x^2 x = A_0 \cos(\omega_x t) + kx + m\dot{x}; \quad (3)$$

$$\ddot{y} + \frac{2}{\tau_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = F_y$$

або

$$\ddot{x} + \left(\frac{2}{\tau_x} - m\right) \dot{x} + (\omega_x^2 - k)x = A_0 \cos(\omega_x t); \quad (4)$$

$$\ddot{y} + \frac{2}{\tau_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = F_y.$$

Коефіцієнти підсилювання  $k$  і  $m$  налаштовуються так, щоб виконувалися співвідношення:

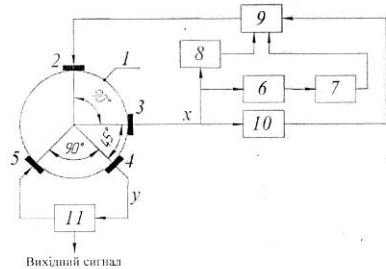
$$m = \frac{2}{\tau_x} - \frac{2}{\tau_y}; \quad k = \omega_x^2 - \omega_y^2. \quad (5)$$

При цьому коефіцієнти демпфування і резонансні частоти для каналів збудження і виміру рівні між собою, а сила  $F_y$  прагне до нуля, тобто мінімізується, а отже і зміщення нуля гіроскопа прагне до нуля.

Таким чином, поставлена задача вирішена: скомпенсована різниця резонансних частот та різниця коефіцієнтів демпфування коливань резонатору, тобто скомпенсовані причини виникнення зміщення нуля гіроскопа, а значить і зміщення нуля.


## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Вібраційний гіроскоп, що містить резонатор з електродами збудження та знімання сигналів, блок збудження первинних коливань, блок формування сигналу, пропорційного кутовій швидкості, який відрізняється тим, що для компенсації зміщення нуля за рахунок вирівнювання різниці коефіцієнтів демпфування коливань і резонансних частот у нього додатково вводяться блок формування швидкості відхилення резонатора від рівноважного положення, вихід якого з'єднаний з входом блока налаштування амплітуди сигналу швидкості відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсумування сигналів, блок налаштування амплітуди сигналу відхилення, вихід якого з'єднаний зі входом блока підсумування сигналів та блок підсумування сигналів, три входи якого з'єднані з виходами блоків налаштування амплітуди сигналу збудження, швидкості відхилення і блока збудження первинних коливань, а вихід з електродом збудження, з коефіцієнти підсилювання блоків налаштування вибираються так, щоб мінімізувати середнє значення вихідного сигналу гіроскопа.



**Матеріали патенту на корисну модель «Електричний двигун постійного струму»**

УКРАЇНА



**ПАТЕНТ**

**НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**


**№ 127341**


**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.07.2018**.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

  
М.І. Тітарчук



(11) 127341

(19) UA (51) МПК (2018.01) H02K 3/00

(21) Номер заявки: u 2018 02152 (72) Винахідник: Беззесліна Олена Миколаївна, UA, Мірошник Сергій Володимирович, UA, Малайов Сергій Прокопович, UA, Петренко Олексій Володимирович, UA, Цірух Віктор Григорович, UA, Цірух Ганна Вікторівна, UA

(22) Дата подання заявки: 02.03.2018

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.07.2018

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 25.07.2018, Бюл. № 14

(73) Власник: ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ "КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ", вул. Старокиївська, 10, м. Київ, 04116, UA

(54) Назва корисної моделі: ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

(57) Формула корисної моделі: Електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням, який складається з явнopolосного індуктора, колектора та якоря з хвильовою обмоткою, який відрізняється тим, що обмотка виконується із збільшеною відносно кількості секцій при приєднанні кожної другої секції послідовно безпосередньо до першої діли на колекторну пластину, що збільшує число активних провідників обмотки якоря при збереженні кількості колекторних пластин та числа паралельних гілок обмотки.

Сторінка 3 з 4

УКРАЇНА (19) UA (11) 127341 (13) U (51) МПК (2018.01) H02K 3/00

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 02152 (73) Власник(и): ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ "КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ", вул. Старокиївська, 10, м. Київ, 04116 (UA)

(22) Дата подання заявки: 02.03.2018

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.07.2018

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.07.2018, Бюл. № 14

(54) ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

(57) Реферат: Електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням складається з явнopolосного індуктора, колектора та якоря з хвильовою обмоткою. Обмотка виконується із збільшеною відносно кількості секцій при приєднанні кожної другої секції послідовно безпосередньо до першої діли на колекторну пластину.

UA 127341 U

UA 127341 U

Корисна модель належить до машинобудування, а саме до електричних машин постійного струму з незалежним збудженням, що використовуються в різних схемах (системах) керування або в силових електродвигунах дистанційного керування.

Відомий електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням, що має явнopolосний індуктор з обмоткою збудження, якорем з хвильовою обмоткою, колектор та штиковий вузол (див. Болдєк А. И. Электрические машины. - М. - Л. издательство Энергия, 1966. - С. 23-36, 73-80).

При необхідності збільшення активних провідників обмотки якоря виникає необхідність збільшення колекторних пластин, що призводить до збільшення габаритів колектора для забезпечення технологічності виготовлення пакета колекторних пластин.

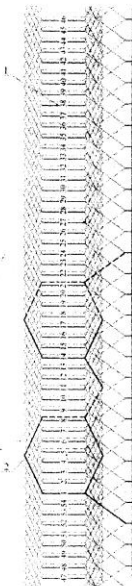
Поставлена задача збільшення активних провідників обмотки якоря при збереженні габаритних розмірів та технологічності виготовлення електричного двигуна досягається збільшенням відносно кількості пазів якоря. На кресленні зображено схему укладання обмотки якоря у пазі поз. 1. При цьому відбувається збільшення кількості секцій поз. 2 хвильової обмотки. Одна секція поз. 2 обмотки виконується як дві послідовно з'єднані секції, вкладаючи з розрахунковим кроком обмотки. При цьому кількість колекторних пластин поз. 3 розраховується для вдвічі меншого числа витків у кожній секції обмотки.

Більша кількість активних провідників обмотки якоря при дії магнітного поля полюсів індуктора дозволяє створювати збільшену результуючу ЕРС, напруги якої визначається за правилом правої руки. Нз кожного провідника діє електромагнітна сила, сукупність яких призводить до виникнення збільшеного результуючого електромагнітного моменту двигуна.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням, який складається з явнopolосного індуктора, колектора та якоря з хвильовою обмоткою, який відрізняється тим, що обмотка виконується із збільшеною відносно кількості секцій при приєднанні кожної другої секції послідовно безпосередньо до першої діли на колекторну пластину, що збільшує число активних провідників обмотки якоря при збереженні кількості колекторних пластин та числа паралельних гілок обмотки.

UA 127341 U



Комп'ютерна версія А. Крижанівський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01005, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глибочицька, 1, м. Київ - 42, 01601

2

## Додаток Д

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір  
 «Комплект конструкторської та технологічної документації приладу  
 «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-04»

**УКРАЇНА**

**ДУБЛІКАТ**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

**СВІДОЦТВО**  
 про реєстрацію авторського права на твір

№ 54790

Комплект конструкторської та технологічної документації приладу  
 "Стабілізатор СВУ-500-7Ц-04"  
(вид, назва службового твору)

Автор(и) Янкелевич Григорій Євсійович, Кохан Юрій Миколайович, Кулінич  
 Леонід Олександрович, Петренко Олексій Володимирович, Малярів Сергій  
 Прокопович, Адаменко Валентин Степанович, Цірук Віктор Григорович  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Публічне акціонерне товариство "Науково-  
 виробниче об'єднання "Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського",  
 вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 15.05.2014


Голова Державної служби  
 інтелектуальної  
 власності України  
 А.Г.Жарінова

*п.р.б.*

М.П.

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір  
 «Комплект конструкторської та технологічної документації приладу  
 «Стабілізатор СВУ-500-7Ц-03»

**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

**СВІДОЦТВО**  
 про реєстрацію авторського права на твір

№ 54855


Комплект конструкторської та технологічної документації приладу  
 "Стабілізатор СВУ-500-7Ц-03" ("Стабілізатор СВУ-500-7Ц-03")  
(вид, назва службового твору)

Автор(и) Янкелевич Григорій Євсейович, Кохан Юрій Миколайович, Кулінич  
 Леонід Олександрович, Петренко Олексій Володимирович, Маляров Сергій  
 Прокопович, Адаменко Валентин Степанович, Цірук Віктор Григорович  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Публічне акціонерне товариство "Науково-  
 виробниче об'єднання "Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського",  
 вул. Старокиївська, 10, м. Київ, 04116  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

19.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби  
 інтелектуальної  
 власності України  
 М.В. Ковчія

*M. V. Kovchiya*